GUILHERME CANUTO DA SILVA

PROTOTIPAGEM RÁPIDA E FERRAMENTAL RÁPIDO APLICADOS ÀS PEÇAS UTILIZADAS EM ENSAIOS ESTÁTICOS DE EMBALAGENS PARA ACONDICIONAMENTO E TRANSPORTE DE PEÇAS AUTOMOTIVAS

São Paulo

2008

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

GUILHERME CANUTO DA SILVA

PROTOTIPAGEM RÁPIDA E FERRAMENTAL RÁPIDO APLICADOS ÀS PEÇAS UTILIZADAS EM ENSAIOS ESTÁTICOS DE EMBALAGENS PARA ACONDICIONAMENTO E TRANSPORTE DE PEÇAS AUTOMOTIVAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre Profissional em Engenharia Automotiva.

Área de Concentração:
Engenharia Automotiva

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Carlos Kaminski

São Paulo
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Guilherme Canuto da
Prototipagem rápida e ferramental rápido aplicados às peças
utilizadas em ensaios estáticos de embalagens para acondicionamento e transporte de peças automotivas / G.C. da Silva. -- São Paulo, 2008.
174 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Desenvolvimento de produtos 2.Manufatura ágil 3.Embalagens (Protótipo) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

A minha esposa Kátia pela compreensão,
incentivo e ajuda irrestrita sempre.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Paulo Carlos Kaminski por ter me aceitado como seu orientado. Sem ele não seria possível a realização e a conclusão deste trabalho.

A Volkswagen do Brasil pelo apoio a pesquisa e pela bolsa de estudos para o curso de mestrado.

Aos meus pais José e Divina pelo alimento espiritual e pelo apoio durante toda minha vida.

A minha irmã Alexandra e a minha sobrinha Erica pelo carinho e afeição sempre presentes.

Aos meus amigos por tudo que fizeram e contribuíram para fazer de mim um ser humano melhor.

A Deus que acima de tudo é pai e criador de todas as coisas.

RESUMO

A necessidade deste trabalho se fez no setor de Planejamento de Fluxo de Materiais e Embalagens (PFME), que pertence ao departamento de engenharia de manufatura de uma filial de montadora instalada no Brasil. Neste setor existe a necessidade de se obter peças protótipo em um menor espaço de tempo possível para realização dos ensaios estáticos dos protótipos das embalagens especiais, uma vez que as embalagens precisam acondicionar as peças produzidas a partir da fase de preparação da produção em série do automóvel (pré-série ou PVS). Neste trabalho, a partir do estudo das tecnologias de *Rapid Prototyping* (RP) - Prototipagem Rápida (RP) e *Rapid Tooling* (RT) – Ferramental Rápido (RT) é selecionada a técnica mais adequada para se atender às necessidades deste setor. Para isto, algumas condições de contorno foram consideradas: a aplicação das técnicas de RP e RT foram restringidas às peças externas do carro como portas, tampas dianteiras, traseiras e pára-lama e as fontes fornecedoras consultadas encontram-se no mercado doméstico. Com base em um estudo de caso pode-se validar esta proposta. Os resultados obtidos com a aplicação da técnica de ferramental rápido *Vacuum Bagging* foram uma redução média de 4,5 meses na obtenção das peças protótipo e uma redução global dos custos de aquisição de aproximadamente R$ 100.000,00.

Palavras-chave: prototipagem rápida; ferramental rápido; peça protótipo; embalagem especial.

ABSTRACT

The need of this work was made in the material flow planning and packing (PFME) section, that belongs to the manufacture engineering department of an assembler company installed in Brazil. In this sector, there is a growing need to obtain prototype parts in the shortest time possible in order to carry out static prototype tests of the special packing, since these racks need to be ready to assist the preparation phase of the series production of the vehicle (pre series or PVS). In this work, beginning from the study of Rapid Prototyping (RP) and Rapid Tooling (RT) technologies is selected the technique more adequate to assist to the needs of this section. For that purpose, some limiting conditions were considered: the application of the RP and RT techniques is limited to the external parts of the vehicle, such as doors, front and back hoods and fenders, and the consulted suppliers should be available in the domestic market. Based in a case study this proposal could be validated. The obtained results with the applied Rapid Tooling Vacuum Bagging technique were a medium reduction of 4,5 months in the prototype parts acquisition and a global reduction in the acquisition costs of approximately R$ 100.000,00.

Keywords: rapid prototyping; rapid tooling; part prototype; special packing.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 O problema que fundamenta a pesquisa 1

1.2 Objetivo da pesquisa 1

1.5 Método da pesquisa 5

2 A EMBALAGEM 6

2.1 Classificação das embalagens 6

2.1.1 Quanto à função 7

2.1.2 Quanto à finalidade 7

2.1.3 Quanto à movimentação 8

2.1.4 Quanto à utilidade 8

2.1.5 Classificação das embalagens abordadas neste trabalho 9

2.2 Sistemática de desenvolvimento da embalagem 9

2.3 Desenho do produto 12

2.3.1 Desenvolvimento do conceito 12

2.3.2 Desenvolvimento de série 13

2.3.3 Preparação da produção em série 14

2.4 Elaboração do FMEA da embalagem 16

2.5 Desenvolvimento do protótipo virtual da embalagem 18

2.5.1 Análise ergonômica 22

2.5.2 Análise de ocupação de carga e transporte rodoviário 25

2.6 Processo de aquisição do protótipo da embalagem 26

2.7 Fabricação do protótipo 28

2.8 Ensaio estático do protótipo da embalagem 28

2.9 Análises e conclusões 31

3 A PEÇA PROTÓTIPO 34

3.1 Processo de aquisição 34

3.2 Quantidades e distribuição das peças protótipo entre os departamentos requisitantes... 36

3.3 Custos 37

3.4 Restrição quanto às fontes fornecedoras 38

3.5 Disposição 39

3.6 Atraso na disposição 39

3.7 Aplicação da peça protótipo no desenvolvimento da embalagem 41

3.8 Análises e conclusões 45

4 PROTOTIPAGEM RÁPIDA 47

4.1 Classificação dos processos de prototipagem rápida (RP) 47

4.2 Processos de prototipagem rápida 48

4.3 Processos baseados em líquido 50

4.3.1 Estereolitografia (SL) 50

4.3.1.2 Materiais disponíveis 52

4.3.1.3 Vantagens da estereolitografia 53

4.3.1.4 Desvantagens da estereolitografia 53

4.3.2 Impressão a jato de tinta (IJP) “PolyJet” 53

4.3.2.1 Método da impressão a jato de tinta “PolyJet” 54

4.3.2.2 Materiais disponíveis 54

4.3.2.3 Vantagens da impressão a jato de tinta “PolyJet” 55

4.3.2.4 Desvantagens da impressão a jato de tinta “PolyJet” 55
4.3.3 Impressão a jato de tinta (IJP) “InVision” 56
4.3.3.1 Método da impressão a jato de tinta “InVision” 56
4.3.3.2 Materiais disponíveis 57
4.3.3.3 Vantagens da impressão a jato de tinta “InVision” 57
4.3.3.4 Desvantagens da impressão a jato de tinta “InVision” 58
4.4 Processos baseados em sólido 58
4.4.1 Modelagem por fusão e deposição (FDM) 58
4.4.1.1 Método da modelagem por fusão e deposição 59
4.4.1.2 Materiais disponíveis 60
4.4.1.3 Vantagens da modelagem por fusão e deposição 60
4.4.1.4 Desvantagens da modelagem por fusão e deposição 61
4.4.4 Impressão a jato de tinta (IJP) “ThermoJet” 61
4.4.4.1 Método da impressão a jato de tinta “ThermoJet” 61
4.4.4.2 Materiais utilizados 62
4.4.4.3 Vantagens da impressão a jato de tinta “ThermoJet” 63
4.4.4.4 Desvantagens da impressão a jato de tinta “ThermoJet” 63
4.5 Processos baseados em pó 63
4.5.1 Sinterização seletiva a laser (SLS) 63
4.5.1.1 Método da sinterização seletiva a laser 64
4.5.1.2 Materiais disponíveis 65
4.5.1.3 Vantagens da sinterização seletiva a laser 65
4.5.1.4 Desvantagens da sinterização seletiva a laser 66
4.5.2 Sinterização a laser sistema “EOSINT” 66
4.5.2.1 Método da sinterização a laser “EOSINT” 66

4.5.2.2 Materiais disponíveis 68
4.5.2.3 Vantagens da sinterização a laser “EOSINT” 68
4.5.2.4 Desvantagens da sinterização a laser “EOSINT” 68
4.5.4 Impressão tridimensional (3DP) 68
4.5.4.1 Método da impressão tridimensional 69
4.5.4.2 Materiais disponíveis 69
4.5.4.3 Vantagens da impressão tridimensional 69
4.5.4.4 Desvantagens da impressão tridimensional 70
4.6 Seleção dos processos de prototipagem rápida estudados 70
4.7 Análises e conclusões 71
5 FERRAMENTAL RÁPIDO 73
5.1 Processos diretos 75
5.1.1 Direct AIM 76
5.1.1.1 Método da Direct AIM 76
5.1.1.2 Vantagens da Direct AIM 76
5.1.1.3 Desvantagens da Direct AIM 77
5.1.2 RapidTool 77
5.1.2.1 Método da Rapid Tool 77
5.1.2.2 Vantagens da RapidTool 78
5.1.2.3 Desvantagens da RapidTool 78
5.1.3 DirectTool (DMLS) 79
5.1.3.1 Método da DirectTool 79
5.1.3.2 Vantagens da DirectTool 79
5.1.3.3 Desvantagens da DirectTool 80
5.1.4 DirectCast 80

5.1.4.1 Método da DirectCast 80

5.1.4.2 Vantagens da DirectCast 81

5.1.4.3 Desvantagens da DirectCast 81

5.2 Processos indiretos 81

5.2.1 Vulcanização à temperatura ambiente (RTV) 81

5.2.1.1 Método da vulcanização à temperatura ambiente 82

5.2.1.2 Vantagens da vulcanização à temperatura ambiente 82

5.2.1.3 Desvantagens da vulcanização à temperatura ambiente 82

5.2.2 Moldes de epoxy 83

5.2.2.1 Método de obtenção de moldes de epoxy 83

5.2.2.2 Vantagens dos moldes de epoxy 84

5.2.2.3 Desvantagens dos moldes de epoxy 84

5.2.3 Vacuum Casting 85

5.2.3.1 Método da Vacuum Casting 85

5.2.3.2 Vantagens da Vacuum Casting 85

5.2.3.3 Desvantagens da Vacuum Casting 86

5.2.4 Vacuum Bagging 86

5.2.4.1 Método da Vacuum Bagging 86

5.2.4.2 Vantagens da Vacuum Bagging 87

5.2.4.3 Desvantagens da Vacuum Bagging 88

5.2.5 Moldes metálicos obtidos por sinterização “Keltool” 88

5.2.5.1 Método da “Keltool” 88

5.2.5.2 Vantagens da “Keltool” 89

5.2.5.3 Desvantagens da “Keltool” 89

5.3 Seleção dos processos de ferramental rápido estudados 89

5.4 Análises e conclusões 91
6 ESTUDO DE CASO 92
6.1.1 Aspectos relevantes 95
6.1.2 Aspectos não relevantes 96
6.2 Fabricação do ferramental em RT 96
6.3 Fabricação da peça protótipo 98
6.4 Ensaio estático da embalagem de pára-lama 100
6.5 Conclusões do estudo de caso 104
7 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS 106
7.1 Resultados qualitativos 106
7.2 Resultados quantitativos 107
7.2.1 Comparativo entre os processos convencional e RT para as demais peças de superfície 110
7.2.2 Os impactos da utilização do processo de RT no desenvolvimento de embalagens 113
7.2.2.1 Processo de aquisição das peças em RT 114
7.3 Análises e conclusões 117
8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS 119
8.1 Estudos futuros 120
REFERÊNCIAS 122
APÊNDICE A - CONCEITOS E APLICAÇÃO DOS CONHECIMENTOS DE FMEA PARA EMBALAGENS 129
APÊNDICE B - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA 133
APÊNDICE C - OUTROS PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA 145

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Lote de embalagens especiais para acondicionamento e transporte de peças de um determinado veículo produzido na montadora.....30
Tabela 3.1 Custo unitário das peças protótipo.....38
Tabela 4.1 Sumário das tecnologias de RP.....70
Tabela 5.1 Sumário das tecnologias de RT.....90
Tabela 6.1 Alternativa 1: Valores preliminares.....93
Tabela 6.2 Alternativa 2: Valores preliminares.....93
Tabela 7.1 Comparativo entre o uso da peça protótipo convencional em a peça protótipo em RP.....106
Tabela 7.2 Valores de custo e tempo de fabricação para as demais peças de superfície em RT.....110
Tabela 7.3 Comparativo dos valores de custos e tempos de fabricação para as demais peças de superfície entre os processos convencional e RT.....111
Tabela 7.4 Sumário dos custos e tempos entre os processos convencional e RT.....118

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 Peças internas de um automóvel produzido na montadora 2
Figura 1.2 Peças externas de um automóvel produzido na montadora..... 3
Figura 2.1 O enfoque do guarda-chuva para o desenvolvimento da embalagem 10
Figura 2.2 O processo de desenvolvimento das embalagens na montadora..... 11
Figura 2.3 O processo básico de lançamento do produto 12
Figura 2.4 Modelo explicativo de formulário para FMEA utilizado na montadora 17
Figura 2.5 Critérios de análise para o FEM 19
Figura 2.6 Critérios de análise do FEM para embalagens 19
Figura 2.7 Estrutura global de uma embalagem para acondicionamento e transporte de laterais externos 20
Figura 2.8 Simulação do comportamento da estrutura da embalagem em condições de empilhamento 21
Figura 2.9 Simulação do carregamento das peças nos tubos centrais internos da embalagem 21
Figura 2.10 Resultados sobre a pergunta: trabalho exige ou não movimentos repetitivos?..... 23
Figura 2.11 Base dos entrevistados que têm algum sintoma e procuram um médico 23
Figura 2.12 Representação das alturas mínima e máxima de pega das peças na embalagem.. 24
Figura 2.13 Volume de ocupação da carreta em função da dimensão da embalagem 25
Figura 2.14 Processo de aquisição de meios e materiais não produtivos 27
Figura 2.15 Protótipo de embalagem para acondicionamento e transporte de laterais externos 31
Figura 3.1 Sistemática atual de aquisição de peças protótipo da montadora..... 36
Figura 3.2 Distribuição das peças protótipo entre os departamentos requisitantes da montadora 37
Figura 3.3 Cronograma do planejamento de aquisição de embalagens desta filial de montadora 40
Figura 3.4 Análise do passo com as peças acondicionadas: proximidade entre as peças e potencial de amassamento das peças 43
Figura 3.5 Análise do contato da barra de travamento com as peças 43

Figura 3.6 a) separadores superiores. b) separadores inferiores. c) detalhe de apoio do flange inferior das peças 44
Figura 3.7 Análise ergonômica e aspectos de segurança do trabalhador 44
Figura 4.1 Princípio do processo de SL 52
Figura 4.2 Princípio do processo de IJP 54
Figura 4.3 Princípio de funcionamento do processo "InVision" 57
Figura 4.4 Princípio de funcionamento do processo FDM da Stratasys 60
Figura 4.5 Princípio de funcionamento da IJP "ThermoJet" 62
Figura 4.6 Princípio de funcionamento do processo SLS 64
Figura 4.7 Princípio de funcionamento do processo "EOSINT" 67
Figura 5.1 Classificação dos processos de RT 73
Figura 5.2 Classificação dos processos de RT 74
Figura 5.3 Classificação dos principais processos de RT disponíveis no mercado doméstico 75
Figura 6.1 Modelos matemáticos em formato IGES 92
Figura 6.2 Embalagem para acondicionamento e transporte do pára-lama 95
Figura 6.3 Secções superior e inferior do pára-lama 97
Figura 6.4 Divisão do molde em secções superior e inferior 97
Figura 6.5 Fabricação da ferramenta em RT 98
Figura 6.6 Ferramental concluído 98
Figura 6.7 Processo de fabricação. Bolsa plástica para gerar ambiente a vácuo 99
Figura 6.8 Peça protótipo finalizada 99
Figura 6.9 Peça protótipo acondicionada na posição inferior direita (vista de frente) da ..... embalagem 100
Figura 6.10 Análise do ponto de inferior de contato da peça com o separador da embalagem 101
Figura 6.11 Análise do ponto superior de contato da peça com o separador da embalagem 101
Figura 6.12 Análise do passo 102
Figura 6.13 Análise do acondicionamento na região superior direita da embalagem 102
Figura 6.14 Detalhe do furo existente no produto utilizado nesta posição de acondicionamento 103
Figura 6.15 Análise do passo entre as peças 103
Figura 6.16 Análise do contato entre as peças acondicionadas 104

Figura 7.1 Comparativo para a peça protótipo do pára-lama 107
Figura 7.2 Comparativo de tempos versus quantidade de peças produzidas para a peça protótipo do pára-lama 109
Figura 7.3 Comparativo para a peça protótipo da porta dianteira externa..... 111
Figura 7.4 Comparativo para a peça protótipo do teto 112
Figura 7.5 Comparativo para a peça protótipo da tampa dianteira externa 112
Figura 7.6 Comparativo para a peça protótipo da tampa traseira externa 113
Figura 7.7 Comparativo para a peça protótipo do lateral externo 113
Figura 7.8 Comparativo entre os processos convencional e proposto para a alternativa 1 115
Figura 7.9 Comparativo entre os processos convencional e proposto para a alternativa 2 116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

0S	*Nullserie*
	(Início da série zero)
3DP	*Three-Dimensional Printing*
3DWM	*Three-Dimensional Welding and Milling*
ÄKO	*Änderungskontrolle*
	(Controle de modificações)
B-Freigabe	*Beschaffungsfreigabe*
	(com liberações de planejamento)
BPM	*Ballistic Particle Manufacture*
CAD	*Computer Aided Design*
CAM-LEM	*Computer Aided Manufacturing – Laminated Engineering Materials*
CC	*Contour Crafting*
CLOM	*Curved Laminated Object Manufacturing*
CNC	*Computer Numerical Control*
DDKM	*Digitales Datenkontrollmodell*
	(Modelo de controle de dados digital)
DE/LH1	*Designentscheidung / Lastenheft 1*
	(Decisão de estilo / Caderno de especificações 1)
DLF	*Direct Light Fabrication*
DLMS	*Direct Laser Material Sintering*
DKM/LH2	*Datenkontrollmodell / Lastenheft 2*
	(Modelo de controle de dados / Caderno de especificações 2)
DORT	Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho
ECLD-SFF	*Electrochemical Liquid Deposition Of Semi-solid Metals*
EFF	*Extrusion Freeforming*
EPDFF	*Electrophotographic Powder Deposition for Freeform Fabrication*
FDC	*Fused Deposition of Ceramics*
FDM	*Fused Deposition Modelling*
FDMet	*Fused Deposition of Metals*
FEM	*Finite Element Method*
FFF	*Fast Freeform Fabrication*

FI	*Fast Inject*
FMEA	*Failure Mode and Effects Analysis*
GMAW	*Gas Metal Arc Welding*
LCRHLS	*Local Chemical Reaction Heat by Laser Scanning*
LCVD	*Laser Chemical Capour Deposition*
LDM	*Laser Diode Manufacturing*
LENS	*Laser Engineering Net Shape*
LER	Lesões por Esforços Repetitivos
LF	*Launchfreigabe*
	(Liberação para lançamento)
LM	*Layered Manufacture*
LML	*Laser Microchemical Lathe*
LOM	*Laminated Object Manufacturing*
M2SLS	*Multimaterial Selective Laser Sintering*
Meso SDM	*Mesoscopic Shape Deposition Manufacturing*
Mold SDM	*Mold Shape Deposition Manufacturing*
OP	Ordem de Produção
P-Freigabe	*Planungs-Freigabe*
	(com liberações de aquisição)
PD	*Projektdefinition*
	(Definição do projeto)
PE	*Projektentscheidung*
	(Decisão do projeto)
PFME	Planejamento de Fluxo de Materiais e Embalagens
PLD	*Pulsed Laser Deposition*
POS	*Positionierung*
	(Posicionamento)
PPD	*Pointwise Powder Deposition*
PPS	*Produktplanungsstart*
	(Início do planejamento de produto)
PVS	*Start produktionsversuchsserie*
	(Início da série de teste de produção)
RBC	*RoboCasting*
RFP	*Rapid Freeze Prototyping*

RP	*Rapid Prototyping*
RPBPS	*Rapid Pattern Based Powder Sintering*
RSLA	*Refrigerative Stereolithpgraphy*
RT	*Rapid Tooling*
RTV	*Room Temperature Vulcanizing*
SADVI	*Selective Area Laser Deposition and Vapour Infiltration*
SALD	*Selective Area Laser Deposition*
SBP	*Statusbericht Produktplanung*
	(Relatório de status do planejamento do produto)
SC	Solicitação de Compra
SGC	*Solid Ground Curing*
SLA	*Stereolithography Apparatus*
SLPR	*Selective Laser Powder Remelting*
SLS	*Selective Laser Sintering*
SP	*Strategische Projektvorbereitung*
	(Preparação estratégica do projeto)
SOP	*Start of Production*
	(Início da produção)
TIF	*Temperature Induced Forming*
TLP	*Thick Layer Prototyping*
V1PT	*Virtuellen 1. Prototypen*
	(Primeiro protótipo virtual)
WFDM	*Wirefeed Direct Metals*

1 INTRODUÇÃO

A necessidade deste trabalho se fez no setor de Planejamento de Fluxo de Materiais e Embalagens (PFME), que pertence ao departamento de engenharia de manufatura de uma filial de montadora instalada no Brasil. Neste setor existe a necessidade de se obter peças protótipo em menor espaço de tempo possível para realização de ensaios estáticos dos protótipos das embalagens, uma vez que as embalagens acondicionam as peças produzidas a partir da fase de preparação da produção em série do automóvel (pré-série[1] ou PVS).

1.1 O problema que fundamenta a pesquisa

O problema de pesquisa é fundamentado no tempo em que a peça protótipo está disponível para análise das embalagens. Atualmente nesta filial de montadora, o atraso na obtenção de peças protótipo para realização de ensaios das embalagens impacta diretamente nas fases posteriores do planejamento. Em casos extremos, a fase de preparação da produção em série do automóvel (PVS) pode ser comprometida, devido à falta de embalagens para acondicionar as peças produzidas.

As peças protótipo têm como função principal auxiliar os engenheiros responsáveis pelo desenvolvimento das embalagens a prever problemas como: interferências entre os separadores da embalagem, contato e atrito entre as peças, condições de acondicionamento, sistemas de travamento das peças na embalagem, aspectos ergonômicos durante o abastecimento e retirada das peças pelos operadores da produção, entre outros fatores.

1.2 Objetivo da pesquisa

De acordo com Kaminski (2000, p. 28) o “O início de qualquer projeto é sempre devido a uma necessidade, que pode ser originada de diversas formas, como uma simples observação de um indivíduo ou como resultado de uma complexa pesquisa de mercado”.

Apoiado nesta afirmação, este trabalho propõe encontrar entre as principais tecnologias de *Rapid Prototyping* (RP) - Prototipagem Rápida (RP) e *Rapid Tooling* (RT) – Ferramental Rápido (RT) a técnica mais adequada para se obter uma redução de tempo na

[1] Pré série ou PVS é a fase de preparação dos meios necessários para produção do veículo. Durante esta fase os equipamentos e máquinas são testados e validados para produção. Nesta fase do programa, outros meios como as embalagens também são testadas e validadas para serem utilizadas na produção.

obtenção das peças protótipo, de forma a atender as necessidades do setor de Planejamento de Fluxo de Materiais e Embalagens (PFME). Em complemento a isto, uma redução de custos no processo de desenvolvimento das embalagens também é esperada.

Para isto, o trabalho está fundamentado no estudo acadêmico, na literatura existente e em um estudo de caso realizado em uma filial de montadora instalada no Brasil.

1.3 Delimitação do assunto tratado

A delimitação do assunto tratado se faz necessária devido aos seguintes fatores: a quantidade e a classificação dos tipos das peças que compõem um automóvel.

Atualmente, um modelo "popular" do tipo *Hatch-Back*[2] , possui cerca de 2.000 peças compradas e aproximadamente 55 peças de fabricação própria da montadora. As peças fabricadas pela própria montadora podem ser classificadas em dois grupos: as peças internas e as peças externas ou comumente chamadas de peças de superfície. As peças internas são aquelas que não são aparentes quando se olha para o automóvel como: tampa dianteira interna, tampa traseira interna, assoalho traseiro, lateral interno, assoalhos dianteiros, reforços das colunas A e B, reforço da soleira e portas internas mostradas na figura 1.1.

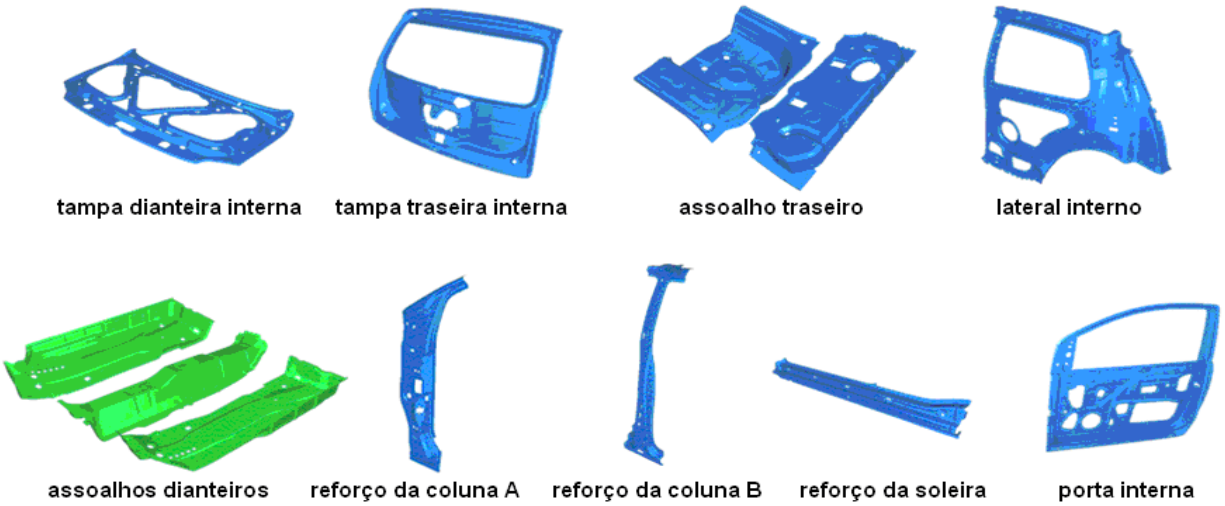


Figura 1.1 Peças internas de um automóvel produzido na montadora (DOCUMENTAÇÃO INTERNA, adaptado pelo autor)

[2] *Hatch Back* é a denominação de um modelo de veículo cujo porta malas está contido no seu interior. É popularmente conhecido como "dois volumes".

As dimensões aproximadas das peças internas de um determinado modelo de automóvel produzido nesta filial de montadora estão compreendidas de acordo com o descrito a seguir:

- tampa dianteira interna, 1345 mm x 1116 mm x 680 mm;
- tampa traseira interna, 1149 mm x 890 mm x 151 mm;
- assoalho traseiro, 1050 mm x 670 mm x 280 mm;
- lateral interno, 1308 mm x 1129 mm x 190 mm;
- assoalhos dianteiros, 1680 mm x 530 mm x 280 mm;
- reforço da coluna A, 450 mm x 530 mm x 280 mm;
- reforço da coluna B, 295 mm x 230 mm x 1260 mm;
- reforço da soleira, 1617 mm x 219 mm x 92 mm;
- porta dianteira interna, 1287 mm x 1163 mm x 132 mm.

As peças de superfície ou peças externas são aquelas que são imediatamente vistas quando se olha para o automóvel como: tampa dianteira externa (ou capô), lateral externo, tampa traseira externa, pára-lama, teto e portas dianteiras externas mostradas na figura 1.2.

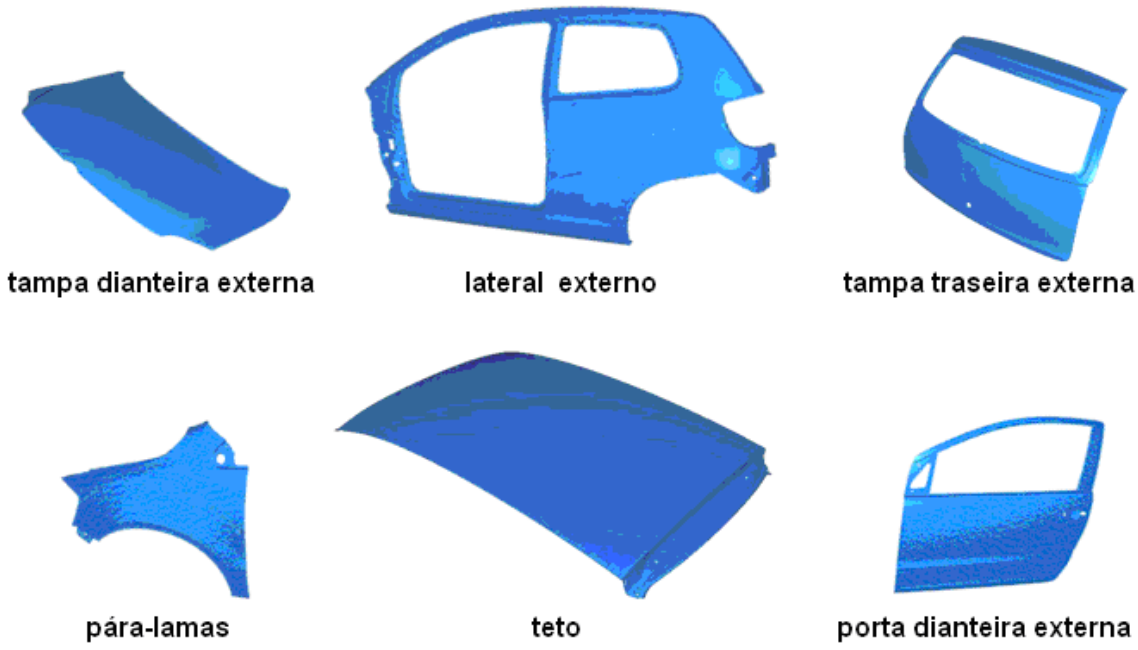


Figura 1.2 Peças externas de um automóvel produzido na montadora (DOCUMENTAÇÃO INTERNA, adaptado pelo autor)

As dimensões aproximadas das peças externas de um determinado modelo de automóvel produzido nesta filial de montadora estão compreendidas de acordo com o descrito a seguir:

- tampa dianteira externa, 1347mm x 1118 mm x 682 mm;
- lateral externo, 2658 mm x 1303 mm x 255 mm;
- tampa traseira externa, 1151 mm x 892 mm x 153 mm;
- pára-lama, 903 mm x 792 mm x 205 mm;
- teto, 1700 mm x 1100 mm x 200 mm;
- porta dianteira externa, 1289 mm x 1165 mm x 134 mm.

Devido à exposição das peças de superfície aos olhos do cliente é essencial o cuidado no acondicionamento destas peças na embalagem.

O contato direto das peças de superfície com as demais peças acondicionadas deve ser evitado. O contato direto pode causar riscos e amassados às mesmas, gerando deméritos de qualidade, variação dimensional e em circunstâncias mais graves o *scrap*[3] das peças.

Outro fator é a espessura das peças de superfície que na maioria dos casos está entre 0,6mm e 0,8mm, facilitando a deformação plástica das mesmas durante o manuseio.

Pelo fato da peça interna não ser aparente, ela possui um grau de acabamento da chapa inferior ao da peça de superfície, assim, o problema do contato direto entre as superfícies não ocorre. As peças podem ser acondicionadas em contato direto e de maneira mais simples.

Outro fator que contribui para este tipo de acondicionamento é a espessura das peças internas, que varia entre 1,0mm e 3,0mm.

A qualidade e a integridade das peças de superfície devem ser garantidas desde o seu acondicionamento na embalagem até a entrega do veículo pronto ao cliente. Devido a estes fatores somente as peças de superfície serão consideradas no estudo de caso deste trabalho.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em 8 capítulos. O capítulo 1 apresenta um resumo do problema e a motivação que levou a pesquisa finalizando no tipo de solução proposta. Está dividido em três subseções. A subseção 1.1 apresenta o problema que fundamenta a pesquisa. Na subseção 1.2 o objetivo do trabalho é mostrado, expondo as tecnologias propostas para a

[3] *Scrap* é uma palavra do idioma inglês que significa sucata, neste caso, pode ser entendida como sucateamento das peças.

solução do problema apresentado na subseção 1.1. Na subseção 1.3 faz-se necessário a delimitação do assunto tratado. A subseção 1.4 descreve a estrutura do trabalho e na subseção 1.5 o método de pesquisa utilizado para a construção do trabalho é definido.

No capítulo 2 são apresentadas as seguintes premissas para o desenvolvimento de embalagens especiais: a sistemática de desenvolvimento da embalagem nesta filial de montadora; a aplicação da ferramenta de avaliação do modo de falha e seus efeitos (FMEA) - *Failure Mode and Effects Analysis* - (FMEA) com foco no projeto da embalagem; o desenvolvimento do protótipo virtual da embalagem; os aspectos ergonômicos que devem ser considerados no projeto; a padronização dimensional das embalagens para otimização da carga no transporte rodoviário; o processo de aquisição; fabricação e os ensaios estáticos.

O capítulo 3 define o conceito de peça protótipo e sua aplicação neste seguimento. Aborda questões de restrições das fontes fornecedoras, custo e tempo de disposição das peças. O capítulo 4 estuda as tecnologias de (RP), as vantagens e desvantagens entre os processos, as restrições, e sua importância no desenvolvimento do produto e na manufatura.

Em complemento ao capítulo 4 no capítulo 5 os processos de *Rapid Tooling* (RT) - ferramental rápido (RT) são apresentados. No capítulo 6 um estudo de caso é apresentado com a aplicação da tecnologia que melhor atende as necessidades deste setor.

No capítulo 7 os resultados são apresentados. Um comparativo entre o processo atual e o processo proposto, bem como os impactos causados com a implementação da nova tecnologia são discutidos. No capítulo 8 o trabalho é encerrado com as conclusões e considerações finais.

1.5 Método da pesquisa

Este trabalho foi baseado em uma pesquisa descritiva onde se buscou através de um estudo de caso comparar os resultados encontrados com a teoria de apoio a pesquisa (FORTE 2004).

Para coleta de informações, foram consultadas documentações internas do setor de PFME situado no departamento de Engenharia de Manufatura de uma filial de montadora no Brasil e pesquisa acadêmica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Também se consultou artigos e periódicos eletrônicos por meio da Internet.

2 A EMBALAGEM

Segundo Moura (1997, p.10), a “Embalagem pode ser definida como sendo o sistema integrado de materiais e equipamentos com que se procura levar os bens e produtos às mãos do consumidor final [...]”.

Ainda segundo Moura (1997), sua origem propriamente dita, parece ter tido lugar por volta do ano 4.000 A.C através do intercâmbio de mercadorias entre o Egito e a Mesopotâmia, porém, recipientes feitos de material argiloso foram utilizados para acondicionar pequenas quantidades de cosméticos para as damas da Mesopotâmia por volta de 3.000 A.C.

Naquela época, não havia a preocupação por parte do homem em acondicionar alimentos ou outros objetos de forma sistêmica ou organizada. Os produtos eram guardados a granel, de modo que a única preocupação era o transporte. Nos dias de hoje, além de transportar determinados produtos, a embalagem também é responsável por garantir a qualidade, integridade e mobilidade dos produtos desde o seu local de fabricação até as mãos do cliente.

Para muitas pessoas, a embalagem não passa de um pacote para embrulhar presentes. A verdade é que a embalagem em sua amplitude envolve conceitos e técnicas bastante complexos, exigindo conhecimentos de resistência dos materiais, fluxo dos materiais, logística, processos de fabricação, movimentação dos materiais, *design*, custos de projeto e fabricação, além de bom senso e criatividade.

Uma definição ampla e abstrata para a embalagem pode ser a seguinte: um conjunto de artes, ciências e técnicas com o objetivo de criar melhores condições de armazenagem, transporte e distribuição, garantindo a integridade dos produtos numa condição razoável ao menor custo global (MOURA, 1997).

2.1 Classificação das embalagens

Existem embalagens que são apenas para o transporte de determinados bens ou produtos (caixa de madeira), embalagens de apresentação (envoltório para barras de chocolates), embalagens de conservação para alimentos e embalagens para outros produtos perecíveis (caixas térmicas ou produtos acondicionados a vácuo). Moura (1997) classificou as embalagens de acordo com os seguintes critérios: função, finalidade, movimentação e utilidade.

2.1.1 Quanto à função

Quanto a sua função as embalagens podem ser primárias, secundárias, terciárias, quaternárias, e de quinto nível.

As primárias são aquelas que contêm o produto, na medida em que ele será produzido ou consumido.

As secundárias acondicionam a embalagem primária protegendo-a. Por exemplo: uma bandeja ou um filme plástico.

As terciárias são uma combinação entre a primária e a secundária. É o caso das caixas de madeira, papelão, plástico e outros materiais construtivos.

As quaternárias envolvem a embalagem secundária, facilitando a movimentação, o transporte e a armazenagem.

As embalagens de quinto nível são caracterizadas por transportar produtos à longa distância. Por exemplo: containeres de carga para transporte marítimo.

2.1.2 Quanto à finalidade

Quanto a sua finalidade as embalagens podem ser de consumo, expositoras, de distribuição física, de transporte, de exportação, industrial ou de movimentação e de armazenagem.

As de consumo podem ser as primárias ou secundárias, que levam o produto ao consumidor. Neste caso, as embalagens são estudadas e projetadas de forma cuidadosa, de forma a atender as expectativas do cliente final.

As expositoras são aquelas que expõem o produto, possuem a característica de chamar a atenção do consumidor seja através de cores ou de informações escritas. Também conhecidas como embalagens de auto-venda, além desta função principal também acondicionam e transportam o produto.

As de distribuição física são aquelas destinadas à proteção do produto. Estas devem suportar condições de carga, descarga, movimentação, armazenagem e transporte até seu ponto de entrega. Por exemplo: engradados de madeira, caixas de papelão, madeira ou plástico, sacos de papel ou plástico, tambores de aço, plástico ou de material hibrido.

As de transporte ou exportação destinam-se a proteção do produto em diversas condições e situações de transporte. São estudadas e projetadas para suportar condições

climáticas, fenômenos dinâmicos e aleatórios, devendo ainda facilitar na movimentação durante as operações.

As de movimentação ou industriais são aquelas que apresentam uso repetitivo e intenso. São projetadas para suportar a movimentação dentro da indústria, entre plantas da mesma empresa e em determinados casos, entre fornecedores e clientes da cadeia logística como, por exemplo: caçambas metálicas, estruturas especiais metálicas ou comumente chamadas de *racks*[4] , paletes, e outras embalagens similares.

As de armazenagem têm como finalidade principal proteger o material ou produto de agentes nocivos externos. Os agentes podem ser: físicos como a temperatura ou a luminosidade; químicos como vapores ácidos ou ação do ar reagindo com o produto e alterando sua composição e parasitas vegetais ou animais como bolores, bactérias, insetos entre outros.

2.1.3 Quanto à movimentação

As embalagens podem ser movimentadas manualmente ou mecanicamente. As embalagens movimentadas manualmente não são desenvolvidas para serem movimentadas com empilhadeiras ou outro tipo de veículo industrial, e seu peso não deve exceder a 30 kg.

A restrição quanto ao peso pode variar de uma indústria para outra, ou de uma montadora para outra. Nesta filial de montadora, a restrição quanto ao peso de uma embalagem movimentada manualmente não deve exceder a 18 kg (ARAÚJO et al, 2005).

As embalagens movimentadas mecanicamente são aquelas em que se têm grandes números de movimentação, distâncias e alturas de armazenagem. Precisam acondicionar o material em quantidade suficiente para suprir altas demandas de produção. Por isso, geralmente ultrapassam o peso máximo permitido para movimentação manual, sendo necessário recorrer à movimentação mecânica.

2.1.4 Quanto à utilidade

Quanto a sua utilização as embalagens podem ser retornáveis ou descartáveis. As retornáveis são aquelas que retornam a sua origem, geralmente embalagens que transportam peças ou produtos dentro de uma cadeia logística, ou de uma fábrica para outra como, por

---

[4] *Racks* é uma palavra do idioma inglês que neste caso pode ser entendida como uma estrutura metálica projetada exclusivamente para um determinado tipo de peça.

exemplo: cestos aramados, caixas metálicas, dispositivos especiais, plataformas metálicas, *racks*, e outras similares.

Também de acordo com Gurgel (2007) existem as gaiolas, que são utilizadas para transportar peças entre as áreas de processo de uma determinada organização. As gaiolas são similares aos *racks*, porém, diferentemente da definição de Gurgel (2007), os *racks* transportam as peças entre os processos, entre as fábricas ou plantas de uma organização, além de acondicionar e armazenar o produto de forma específica.

São projetadas para ter uma vida útil longa compatível com o período de produção produto. Necessitam de investimento, manutenção e geralmente são identificadas com o nome do proprietário para segregação e coleta após o consumo do produto transportado.

As não-retornáveis ou descartáveis são aquelas utilizadas em um único ciclo de distribuição. Por exemplo: caixas de papelão, sacos plásticos, papéis e outras. As embalagens descartáveis não necessitam de investimento e por isso são consideradas como despesa. Acondicionam o produto até o destinatário que pode reaproveitá-la por uma ou mais vezes dependendo do material construtivo.

2.1.5 Classificação das embalagens abordadas neste trabalho

De acordo com a subseção 1.2 somente as peças de superfície serão abordadas neste trabalho. Para o acondicionamento destas peças são necessárias embalagens com características especiais, que podem ser classificadas de acordo com as seguintes definições de Moura (1997):

- embalagens primárias;
- embalagens industriais ou de movimentação;
- embalagens movimentadas mecanicamente;
- embalagens retornáveis.

Uma vez classificadas neste trabalho, estas embalagens serão denominadas apenas de embalagens especiais ou simplesmente embalagens.

2.2 Sistemática de desenvolvimento da embalagem

Segundo Moura (1997, p.38) “Algumas empresas se conscientizaram de que são necessários alguns aperfeiçoamentos na área de desenvolvimento de embalagens. Elas agora

utilizam agora o que pode ser chamado de enfoque do “guarda-chuva” para o seu trabalho de desenvolvimento” mostrado na figura 2.3.

Figura 2.1 O enfoque do guarda-chuva para o desenvolvimento da embalagem (MOURA, 1997)

Nesta filial de montadora, o desenvolvimento da embalagem ocorre de forma similar ao guarda-chuva de Moura (1997). O fluxograma da figura 2.4 mostra de forma básica o desenvolvimento deste processo.

1) - Engenharia de Produto libera desenhos de produto no banco de dados eletrônico da empresa

2) - O PFME avalia a necessidade de desenvolvimento da embalagem especial de acordo com as propriedades físicas da peça.

3) - Um time multifuncional composto de especialistas e engenheiros das áreas de segurança do trabalho, produção, qualidade assegurada, logística de fábrica e engeharia de manufatura é reunido para elaboração do FMEA da embalagem. Este time deverá permanecer junto até a aprovação final da embalagem física.

4) - Com base no desenho do produto o PFME desenvolve um protótipo virtual da (s) embalagem (s).

5) - O PFME emite uma S.C (solicitação de compras) por meio eletrônico para o departamento de compras que inicia o processo de cotação junto as prováveis fontes fornecedoras.

6) - Com o protótipo físico construído, o PFME o submete ao ensaio estático junto ao time multifuncional (3).

7) - Em caso de não aprovação do protótipo físico, o mesmo é devolvido ao fornecedor responsável pelo seu desenvolvimento, que efetua alterações ou melhorias conforme solicitação do PFME.

8) - Uma vez que o protótipo físico é aprovado pelo time multifuncional, o (s) fornecedor (s) é (são) liberado (s) para fabricação do lote de embalagens.

9) - O PFME emite uma S.C conforme item (5).

10) - O PFME autoriza o fornecedor a entregar o lote de embalagens ao cliente responsável, seja a produção ou a logística de acordo com a planta.

11) - Durante o período de entrega do lote de embalagens, o fornecedor entrega a documentação técnica da embalagem (laudo técnico, A.R.T - anotação de responsabilidade técnica, desenho construtivo, etc) ao PFME que verifica a documentação. Uma vez que todas as pendências estão sanadas, a documentação é entregue aos clientes, finalizando o processo.

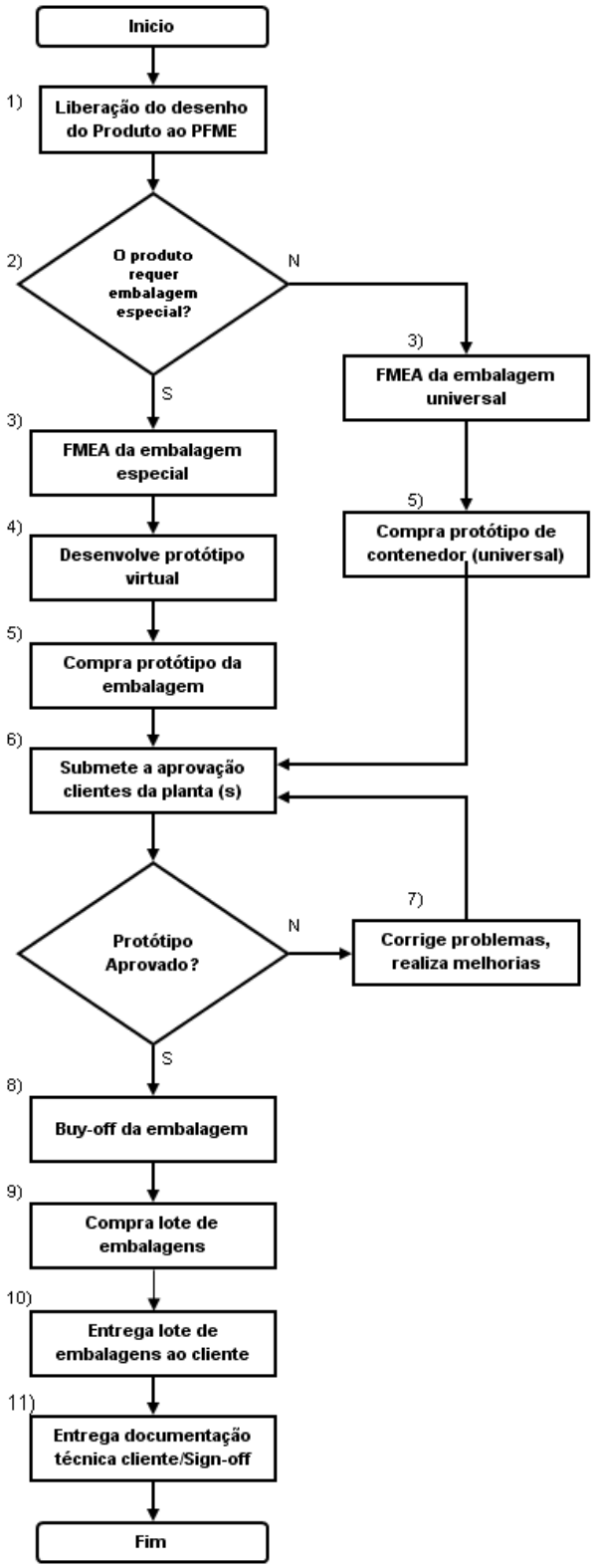


Figura 2.2 O processo de desenvolvimento das embalagens na montadora

2.3 Desenho do produto

O desenho do produto é fundamental para o desenvolvimento do protótipo virtual da embalagem especial. Durante o desenvolvimento do primeiro protótipo virtual do veículo (V1PT), os desenhos do produto são disponibilizados eletronicamente aos setores do departamento de engenharia de manufatura para análise e planejamento dos meios necessários a sua fabricação.

O desenvolvimento do veículo está estruturado em três fases: o desenvolvimento do conceito, o desenvolvimento de série e a preparação da produção em série (KRUSCHWITZ; DUSKE, 2004) de acordo com a figura 2.5.

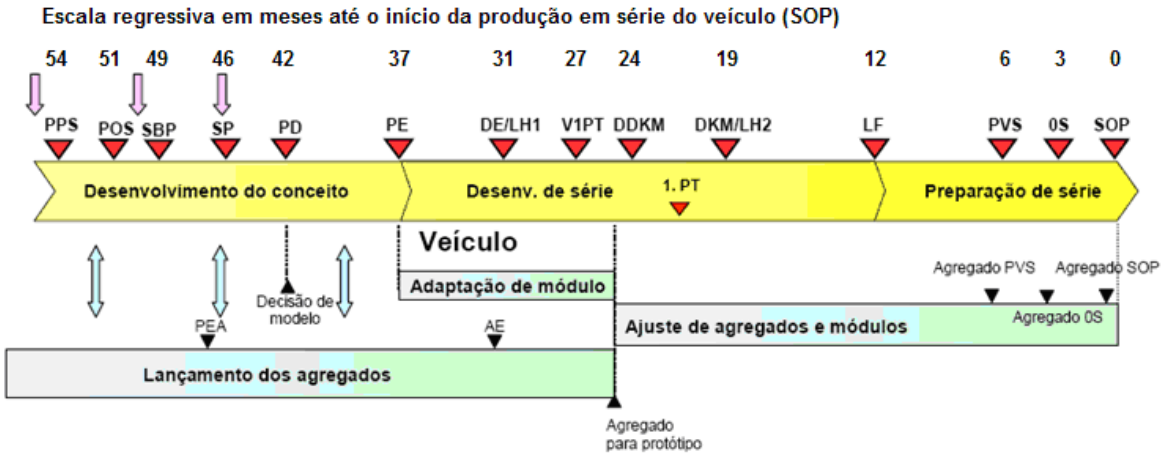


Figura 2.3 O processo básico de lançamento do produto (KRUSCHWITZ; DUSKE, 2004)

2.3.1 Desenvolvimento do conceito

No início do planejamento (PPS) inicia-se a implementação estratégica do produto, com apoio de uma equipe composta por membros de todas as áreas corporativas (*product team*[5]) baseada na estratégia de marcas da companhia e do plano de vida do produto (*cycle plan*[6]).

A fase de posicionamento (POS) é caracterizada pela confirmação das características do veículo com base no mercado. Com isso, é obtido um posicionamento antecipado do

[5] *Product team* é uma expressão do idioma inglês utilizada por esta filial de montadora que neste caso significa time de desenvolvimento do produto.

[6] *Cycle plam* é uma expressão do idioma inglês utilizada por esta filial de montadora que neste caso significa o ciclo ou tempo de vida útil do modelo a ser produzido.

produto com o departamento de marketing. Também se confirmam às primeiras dimensões externas e ergonômicas e o portfólio de produtos da companhia.

Com base nas variantes e tendências dos conceitos seguintes, um fórum responsável pela aprovação do conceito delega o conceito escolhido para continuação do desenvolvimento e do estilo. Esta fase intermediária é chamada de relatório de status do planejamento do produto (SBP).

O desenvolvimento do conceito é coordenado pelo planejamento do produto, que recebe informações do *product team* desde o inicio do planejamento (PPS) até a preparação estratégica do projeto (SP).

Uma vez atingida à etapa de definição do projeto (PD), o conceito com o *package freeze*[7] da plataforma e agregados é aprovado com base na seleção de dois modelos de estilo. Na fase de decisão do projeto (PE) o desenvolvimento do conceito é finalizado com aprovação obrigatória do conceito do veículo. Nesta fase, os modelos apresentados são avaliados, visando à capacidade de realização e execução técnica. É gerado um caderno de especificações do cliente. Os conceitos são transferidos para a organização de projeto do desenvolvimento de série e para os departamentos técnicos.

Os setores do departamento de engenharia de manufatura iniciam seus trabalhos de investigação das necessidades para a produção do veículo baseados em premissas da engenharia do produto e dos modelos produzidos anteriormente na montadora.

2.3.2 Desenvolvimento de série

No desenvolvimento de série, o modelo de estilo idealizado é detalhado junto ao caderno de especificações 1 (LH1) e definido no fórum de decisão de design (DE/LH1). Posteriormente, o modelo escolhido sobre processamento no *strak* (descrição geométrica de superfície) serve como base para os modelos de controle de dados (DKM) virtuais, físicos e de protótipos.

Nesta fase, o desenvolvimento e a formação dos veículos conceito são realizados de forma paralela, com a validação do projeto através de cálculo e simulação.

Na etapa de encaminhamento do primeiro protótipo virtual (VPT1) são realizadas as liberações P (*Planungs-Freigabe*) das peças (liberações de aquisição) e é feito o pedido de construção do primeiro protótipo físico.

---

[7] *Package Freeze* é uma expressão do idioma inglês que pode ser entendido como plataforma virtual do veículo incluindo sua estrutura modular.

As liberações P específicas de cada peça dão início à preparação dos meios e investimentos necessários para produção do veículo.

Com a liberação P dos desenhos de produto, a engenharia de manufatura inicia um trabalho de refinamento do planejamento iniciado na fase de decisão do projeto (PE) e o PFME inicia o trabalho de desenvolvimento dos protótipos das embalagens especiais.

Após aprovação do modelo de controle de dados digitais (DDKM) vinte e quatro meses antes da produção em série do veículo, todos os elementos visíveis ao cliente são apresentados e anuncia-se o pedido de construção do modelo físico (DKM).

Os protótipos apresentados virtualmente na fase de decisão de estilo (DE/LH1) são encaminhados para construção e testes físicos. Com a aprovação do DKM dezenove meses antes da SOP, ocorre a aprovação do modelo de controle de dados (DKM/LH2), do caderno de especificações 2 e paralelamente a liberação B (*Beschaffungsfreigabe*) dos desenhos de produto (liberações de planejamento). A liberação B é uma etapa importante para os departamentos que desenvolvem os meios e instalações necessárias para a produção do veículo pois, a partir desta etapa, o produto não é alterado. As alterações posteriores a esta data são comunicadas através de ÄKO[8]. Assim, as demais áreas envolvidas com o processo podem justificar as necessidades adicionais em função da alteração do produto.

De posse destas informações, os meios necessários para produção em série do veículo são adquiridos pela engenharia de manufatura. Os protótipos virtuais das embalagens especiais são submetidos ao processo de compras para aquisição. Assim, todos os meios e embalagens estarão disponíveis em quantidades suficientes para o início da série de teste da produção do veículo (PVS).

Na liberação de lançamento (LF) doze meses antes da SOP, é confirmada a qualidade e a disponibilidade de peças necessárias para a produção do veículo. Isto é feito para os processos seguintes, de acordo com o planejamento de implementação do veículo no mercado. Além disso, a liberação de lançamento (LF) também serve para definir medidas alternativas caso ocorra desvios no objetivo de lançamento da produção em série do veículo.

2.3.3 Preparação da produção em série

Durante a preparação da produção em série (pré-série) dois meses antes da produção em série do automóvel, alguns veículos são montados nas fábricas-piloto com peças

[8] ÄKO é uma sigla de origem alemã que significa *änderungskontrolle* e pode ser entendida como controle de modificações.

produzidas internamente em ferramentais definitivos e por fornecedores nesta mesma condição para liberação da série (VFF).

As fases de teste da produção (PVS) seis meses antes da SOP e série zero (OS) três meses antes da SOP são realizadas utilizando os meios de produção disponíveis em condições de produção em série do automóvel.

Para que a produção possa ser assegurada em qualidade e quantidade, os parâmetros de produção são verificados em um instante chamado de produção de dois dias. O instante para esta produção ocorre de acordo com o escopo, o processo, os pré-produtos e as instalações; da mesma forma com relação à quantidade, a duração e o prazo. O início da produção em série do veículo só é autorizado quando o nível de qualidade exigido pela garantia da qualidade é atingido.

Os veículos produzidos na pré-série são utilizados para confirmar o nível de qualidade e testes de homologação. Os testes são realizados nove semanas antes da SOP. Finalmente, após a aprovação da companhia, a liberação da série é realizada e tem-se o início da produção definitiva do volume a ser introduzido no mercado.

De forma sintetizada, o processo básico de desenvolvimento do veículo pode ser descrito na forma de tópicos, com escala regressiva dos meses para cada fase do processo até a SOP.

Desenvolvimento do conceito (PPS até PE)

- Início do planejamento do produto (PPS) 54 meses
- Posicionamento (POS) 51 meses
- Relatório de status do planejamento do produto (SBP) 49 meses
- Preparação estratégica do projeto (SP) 46 meses
- Definição do projeto (PD) 42 meses
- Decisão do projeto (PE) 37 meses

Desenvolvimento de série (PE até LF)

- Decisão de estilo e caderno de especificações 1 (DE/LH1) 31 meses
- Primeiro protótipo virtual (VPT1) 27 meses
  Com liberações de planejamento (liberação P)

- Modelo de controle de dados digital (DDKM) 24 meses
- Modelo de controle de dados /caderno de especificações 2 (DDKM/LH2) 19 meses
  Com liberação de aquisição (liberação B)
- Liberação de lançamento (LF) 12 meses

Preparação de série (LF até SOP)

- Início da série de teste de produção (PVS) 6 meses
- Início da série zero (OS) 3 meses
- Início da produção (SOP) 0 mês

2.4 Elaboração do FMEA da embalagem

De acordo com Souza (2002) “o FMEA é um método empregado na melhoria de projetos de sistemas, na determinação de pontos vulneráveis no projeto, na concepção de testes do tipo *built-in*, no projeto de linhas de produção (chão de fábrica) e no planejamento da manutenção [...]”.

Também segundo Sortino (2005) a análise dos modos de falha em potencial e seus efeitos (FMEA) teve seu desenvolvimento na década de 1960 com aplicação na indústria aeroespacial americana. Seu principal objetivo era auxiliar engenheiros e especialistas a prever e eliminar problemas ainda na fase de desenvolvimento do produto ou do processo.

Uma vez definida a embalagem especial conforme exposto na subseção 2.1.4, o PFME utiliza a ferramenta FMEA para que as falhas em potencial sejam detectadas e consideradas no desenvolvimento do protótipo da embalagem. É convocado um time multifuncional composto de engenheiros e especialistas das áreas de qualidade assegurada, segurança do trabalho, medicina ocupacional, logística, produção estamparia e armação para discutir todos os pontos que sejam relevantes ao desenvolvimento da embalagem. Os principais pontos discutidos são:

- ergonomia, sob o aspecto da saúde ocupacional do operador durante o abastecimento e a retirada das peças da embalagem;
- funcionamento da embalagem, com foco na interface homem-máquina e na segurança;
- estrutura, assegurando a capacidade de suportar cargas em condições estáticas e dinâmicas;

- integridade das peças, durante o manuseio, acondicionamento e transporte das peças;
- armazenamento, considerando o estoque e ocupação de áreas de logística;
- capacidade de acondicionamento, otimizando a quantidade de peças por embalagem;
- transporte, capacidade de modulação da carga e aproveitamento máximo do caminhão.

Após consenso do time multifuncional, os pontos são colocados em um formulário específico do FMEA utilizado nesta filial de montadora e pontuados de acordo com os critérios de severidade, detecção e ocorrência. A figura 2.6 mostra um modelo explicativo do formulário de FMEA.

MODELO EXPLICATIVO PARA PREENCHIMENTO

FMEA de PROCESSO - ANÁLISE do MODO e dos EFEITOS de FALHAS em POTENCIAL

Nome do FMEA				
Nome e Número da Peça/ Conjunto/ Processo			Programa	
Setor Emitente		Eng. Responsável	Plantas/ fornecedores atingidos	Cliente
Time FMEA emitente Rev 00	Nome	Departamento/ Ramal	Data Emissão - Rev 00	Comentários
Time FMEA emitente Rev	Nome	Departamento/ Ramal	Data Retroalimentação - Rev	Histórico Citar o Evento que gerou a revisão do FMEA

Nome e Número da Peça/ Conjunto/ Processo — MODELO EXPLICATIVO PARA PREENCHIMENTO

Função do processo/ produto	Modo / Tipo de falha potencial	Efeito potencial da falha	Classificação	Causa potencial / mecanismos de falha	Controles atuais no processo	Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR	Ação recomendada / nome do responsável / data prevista	Previsto			Ações tomadas/ data efetiva	Real		
											Ocorrência	Detecção	NPR		Ocorrência	Detecção	NPR
Procurar descrever no formato de verbo + substantivo + especificações de engenharia com suas respectivas tolerâncias. Ex.: Furar Diâmetro 6.0 +/- 0,2 mm	Fazer a Pergunta: O que pode dar errado? - Função não Realizada - Função Parcial - Função Intermitente -Função Degradada -Função Exagerada. Ex.: 1. Furo Inexistente 2. Diâmetro excessivo do furo (>6,2 mm) 3. Furo na forma oval.	Os grupos genéricos -Pequenas Insatisfações dos clientes -Interferência com outros sistemas -Insatisfações significativas do cliente -Diminuição da performance -Afeta regulamentação governamental -Afeta segurança	D = Crítico / Segurança * = Significativo	Considerar que peças e materiais provenientes de operações anteriores estão corretas. Considerar as variações de entradas.	Pensar nos controles dos processos atuais / similares Ex.: - inspeções - cep - auditorias - dispositivos automáticos - poka-yoke - verificações de setup	CONFORME TABELA	CONFORME TABELA	CONFORME TABELA	Multiplicar Severidade X Ocorrência X Detecção	Descrever ações que visam eliminar ou minimizar a ocorrência de eventuais causas de falhas no processos. Colocar o Nome do Responsável e Prazo para as ações. OBS.: Estas datas devem ser monitoradas para se verificar se as ações ocorreram e se foram eficazes.	CONFORME TABELA	CONFORME TABELA	Multiplicar Severidade X Ocorrência X Detecção	Verificar após o vencimento do prazo a eficácia das ações tomadas e eventuais ações complementares que possam ter sido realizadas.	CONFORME TABELA	CONFORME TABELA	Multiplicar Severidade X Ocorrência X Detecção

Figura 2.4. Modelo explicativo de formulário para FMEA utilizado na montadora (DOCUMENTAÇÃO INTERNA, adaptado pelo autor)

No apêndice A deste trabalho maiores detalhes sobre a aplicação do FMEA para o desenvolvimento da embalagem são apresentados.

2.5 Desenvolvimento do protótipo virtual da embalagem

O protótipo da embalagem é fabricado com o propósito de analisar o acondicionamento e a sua capacidade de transporte sem comprometer a qualidade e a integridade das peças, proporcionando condições ergonômicas favoráveis e movimentação mecânica segura.

Por ser um equipamento submetido a condições intensas de movimentação e cargas dinâmicas, simulações computacionais com o objetivo de antever o comportamento destes fenômenos na estrutura são realizadas. Como ferramenta de análise utiliza-se o *Finite Element Method* (FEM) - Método dos Elementos Finitos (FEM).

De acordo com Nabarrete (2005, p.57), "O método de elemento finito é um procedimento numérico que pode ser aplicado para obter soluções em uma variedade de problemas de engenharia".

Utilizado inicialmente em problemas de elasticidade (BATHE, 1976), este método teve seu domínio rapidamente estendido à análise de outros problemas como os de transferência de calor e mecânica dos fluidos.

O objetivo do método é obter uma formulação matemática capaz de explorar a análise de forma automática, de sistemas complexos ou irregulares através da utilização de programas computacionais. Para isso, o método considera o sistema global equivalente a um agrupamento de elementos finitos no qual cada elemento é uma estrutura contínua (TAVARES, 1998).

Apesar de o método considerar elementos individuais como contínuos, o método é na sua essência um processo de discretização, pois demonstra os deslocamentos em qualquer ponto do elemento contínuo em um número finito de deslocamentos em pontos nodais multiplicados por funções de forma (ou funções de interpolação). A partir destes deslocamentos, por diferenciação são obtidas as deformações e a partir destas as tensões (TAVARES, 1998).

De acordo com Alves Filho (2005) existem três passos importantes envolvidos em qualquer análise pelo FEM: o pré-procesamento, onde é montado um modelo discretizado da estrutura com as devidas aplicações das condições de contorno; o processamento, onde são efetuados os cálculos matriciais para determinação dos deslocamentos, reações de apoio e forças internas e o pós-processamento onde os resultados são interpretados, verificando sua coerência com o problema físico estudado, de acordo com a figura 2.7.

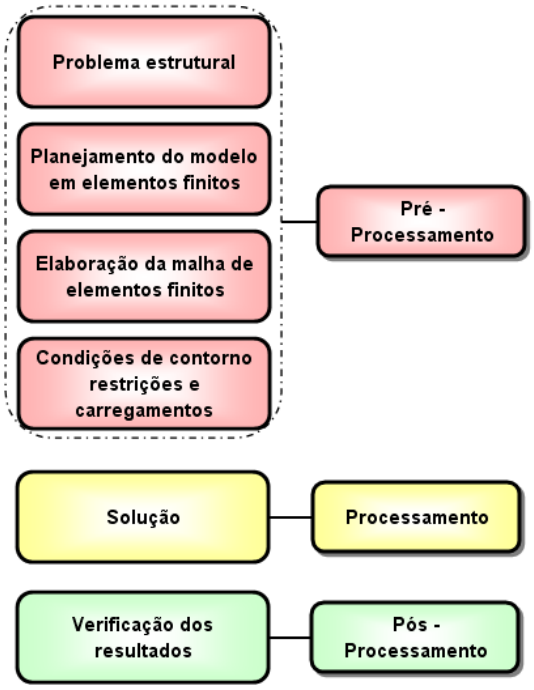


Figura 2.5 Critérios de análise para o FEM (ALVES FILHO, 2005)

Dentro destes passos, a análise estrutural da embalagem pode ser associada de acordo com a figura 2.8.

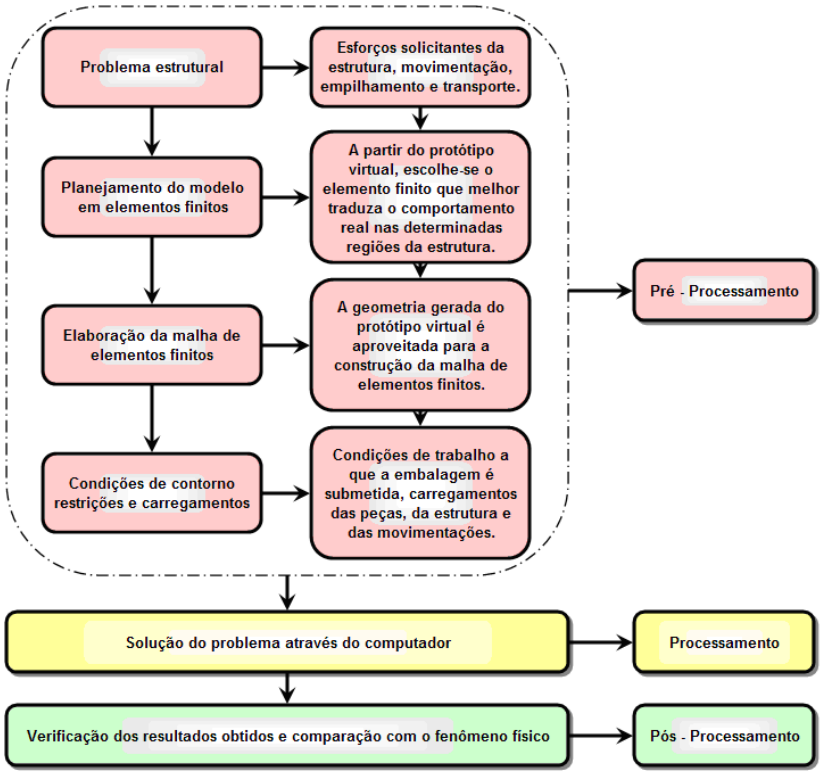


Figura 2.6 Critérios de análise do FEM para embalagens (ALVES FILHO, 2005 - adaptado pelo autor)

Desta forma, a partir do desenho do produto é construído um protótipo virtual da embalagem utilizando a tecnologia de *Computer Aided Design* (CAD) – Projeto Assistido por Computador (CAD), onde é possível se obter um modelo tridimensional da embalagem. Primeiramente é construída uma estrutura global da embalagem com base nas dimensões do produto e demais premissas estabelecidas pelo time multifuncional no FMEA.

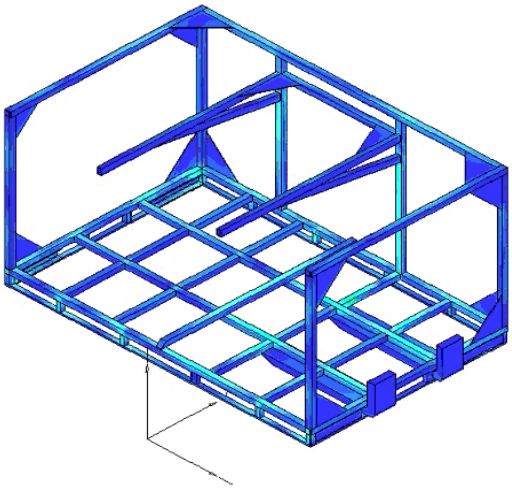


Figura 2.7 Estrutura global de uma embalagem para acondicionamento e transporte de laterais externos (DOCUMENTAÇÃO INTERNA, adaptado pelo autor)

Posteriormente, o modelo construído serve de base para a geração da malha de elementos finitos. Através de uma biblioteca de elementos finitos disponível no software, escolhe-se o elemento finito capaz de representar de melhor maneira o estado real do fenômeno físico.

Para a simulação do comportamento da estrutura, as condições de empilhamento, movimentação por empilhadeiras, abastecimento e retirada das peças da embalagem são traduzidas em restrições e condições de contorno para o processamento das informações.

Com o modelo definido ocorre o processamento pelo computador. Os resultados obtidos no pós-processamento podem ser analisados com o auxílio dos recursos de computação gráfica disponíveis nos softwares de FEM. As figuras 2.8 e 2.9 exemplificam o uso deste recurso.

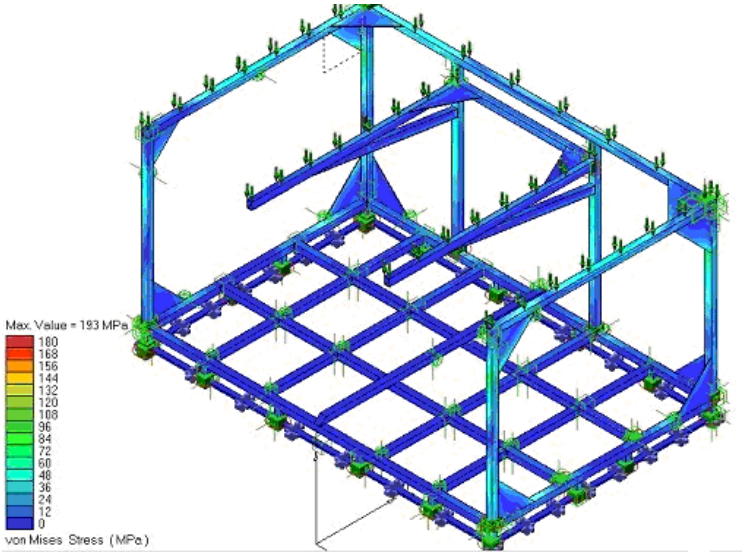


Figura 2.8 Simulação do comportamento da estrutura da embalagem em condições de empilhamento (DOCUMENTAÇÃO INTERNA, adaptado pelo autor)

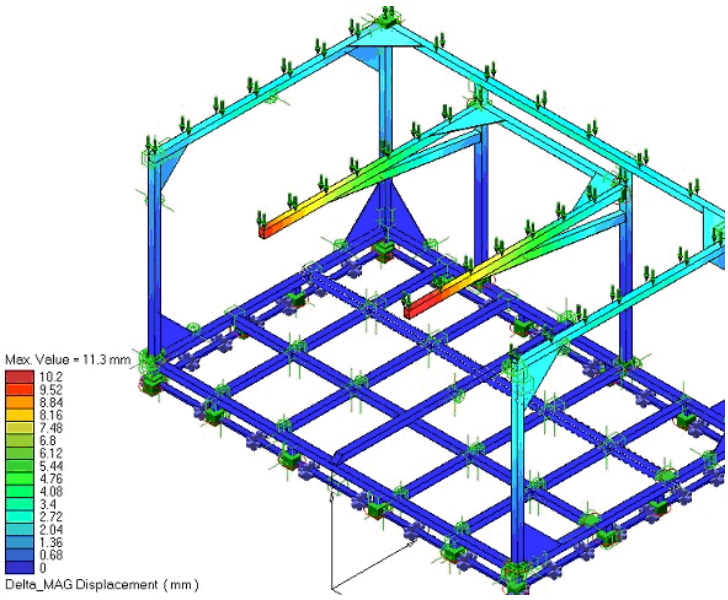


Figura 2.9 Simulação do carregamento das peças nos tubos centrais internos da embalagem (DOCUMENTAÇÃO INTERNA, adaptado pelo autor)

Com a interpretação dos resultados ocorre a validação estrutural da embalagem. Atualmente nesta filial de montadora, os trabalhos de simulação para validação estrutural da embalagem são terceirizados a fornecedores responsáveis pela construção dos protótipos físicos. Estes fornecem uma documentação oficial do conselho regional de engenheiros e arquitetos (CREA) que garante o funcionamento da embalagem, neste caso o laudo técnico e a anotação de responsabilidade técnica (ART).

2.5.1 Análise ergonômica

A palavra ergonomia vem do grego ERGON (trabalho) e NOMOS (princípio ou lei) que pode ser definido como o conjunto de conhecimentos científicos relacionados ao homem, necessários na concepção de ferramentas, máquinas, dispositivos e outros meios que possam ser utilizados em condições de conforto, segurança e eficiência no trabalho (WISNER, 1997). Segundo Przysiezny (2000, p. 11), “A ergonomia tem pelo menos duas finalidades, uma é o melhoramento e a conservação da saúde dos trabalhadores e a outra é a concepção e o funcionamento satisfatórios dos sistemas técnicos do ponto de vista da produção e da segurança”.

Um posto de trabalho mal planejado sob o aspecto ergonômico pode causar aos trabalhadores doenças como as Lesões por Esforços Repetitivos (LER) ou Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (DORT). Em determinadas circunstâncias, as LER/DORT podem levar o trabalhador ao afastamento médico e restrições permanentes de suas atividades.

De acordo com Todeschini (2001) apud Maeno (2001) “Cerca de 80% a 90% dos casos de doenças relacionadas ao trabalho notificadas nos últimos 10 anos no país são representadas pelas LER/DORT [...]”.

Existem muitas definições para as Lesões por Esforços Repetitivos (LER) ou Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (DORT). Uma delas é a sobrecarga acumulada com o passar do tempo nas partes moles do sistema músculo-esquelético do corpo humano. Sem tempo para que o músculo descanse para se recuperar, as articulações, tendões e músculos vão sofrendo alterações e começam a ter dificuldades para responder as ordens do sistema nervoso central, seja pela dor ou pela lentidão (MAENO, 2001).

Com o passar de meses e anos, as articulações, tendões e músculos continuam sendo exigidos para sustentar o corpo e executar movimentos repetitivos, provocando desgastes e assim o surgimento de fadiga e dor que inicialmente não são percebidos pela pessoa. Depois são percebidos durante a execução de movimentos dentro e fora da jornada de trabalho, causando a sensação de que os períodos de repouso (folgas) são insuficientes (MAENO, 2001).

Em uma pesquisa realizada pelo instituto nacional de prevenção às LER/DORT em julho de 2001, baseada em uma amostra de 1.072 entrevistas em um universo de trabalhadores da cidade de São Paulo com 16 anos ou mais constatou que 310 mil trabalhadores têm diagnóstico de LER/DORT (ERGONET, 2007).

Os gráficos das figuras 2.10 e 2.11 demonstram alguns dos detalhes da pesquisa.

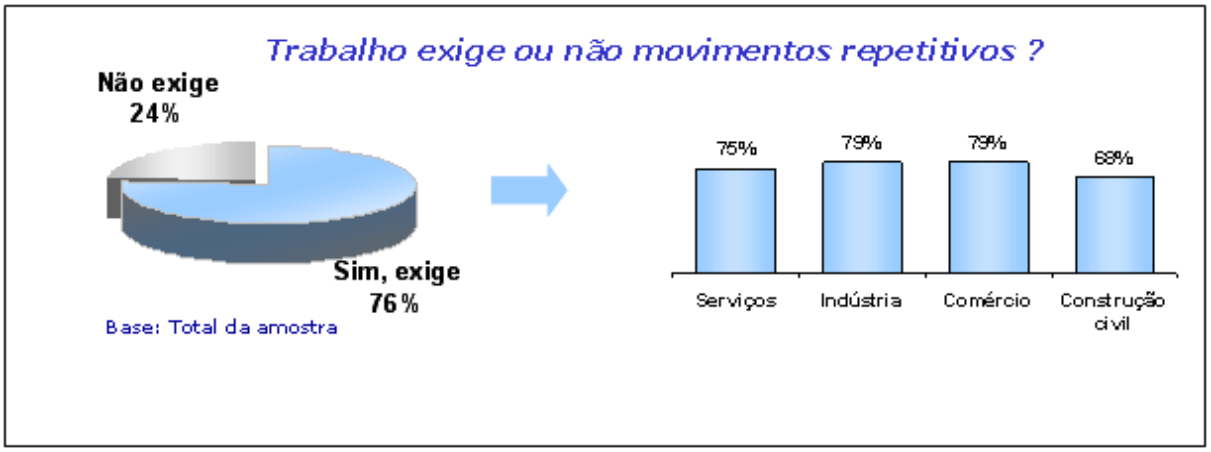


Figura 2.10 Resultados sobre a pergunta: trabalho exige ou não movimentos repetitivos? (Datafolha, 2001)

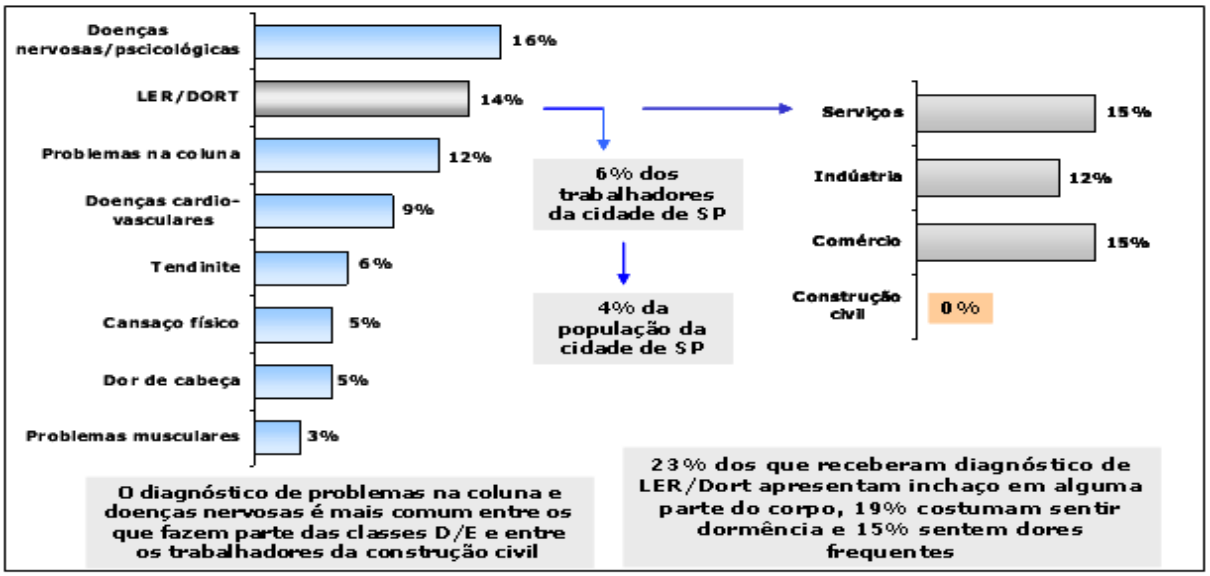


Figura 2.11 Base dos entrevistados que tem algum sintoma e procuram um médico (Datafolha, 2001)

De acordo com Przysiezny (2000, p. 8) “No Brasil, os trabalhadores que mais apresentam diagnósticos de LER/DORT são principalmente operários na linha de montagem, bancários e digitadores [...]”.

Ainda segundo Przysiezny (2000, p. 8) “Estes profissionais apresentam uma significativa incidência de dor e desconforto nos membros superiores e na coluna cervical”. Em face destes cenários, o estudo da ergonomia mostra-se importante.

Por ser um equipamento que permanece de forma estática durante o abastecimento e retirada das peças pelo trabalhador, a embalagem pode ser considerada neste instante um posto de trabalho. Para isso, é importante que a mesma seja projetada de forma a adaptar as

condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, de modo a proporcionar o máximo de conforto, segurança e desempenho eficiente (NR 17 - Ergonomia (117.000-7), 2007).

Nesta filial de montadora, o departamento de medicina do trabalho (ou saúde ocupacional) convencionou com base nos estudos de LER/DORT condições mínimas e máximas para os pontos de pega das peças pelo operador, para que este se movimente dentro de uma zona de conforto ergonomicamente segura. Na embalagem, esta zona de conforto está compreendida entre 600mm e 1300mm, conforme mostra a figura 2.12.

Estas restrições visam principalmente à preservação dos membros superiores como braços, punhos, ombros e a coluna cervical.

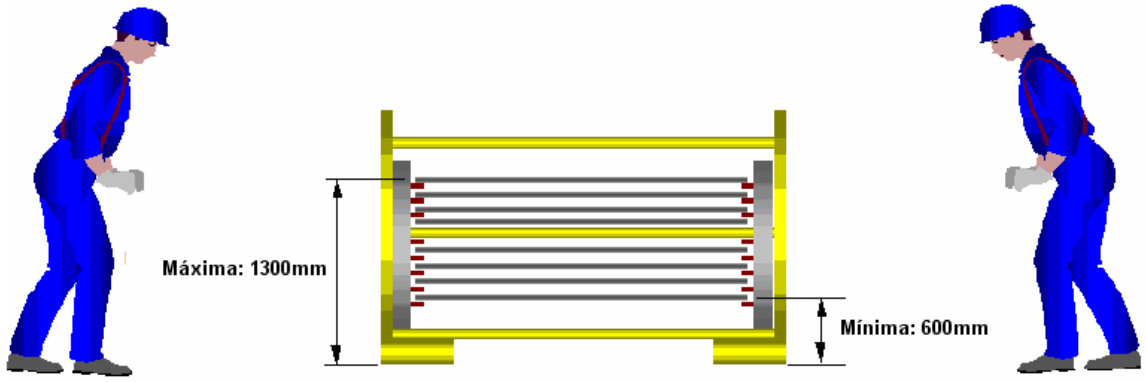


Figura 2.12 Representação das alturas mínima e máxima de pega das peças na embalagem[9]

Para solucionar o problema dos esforços repetitivos, foi introduzido um sistema de rotatividade dos trabalhadores. De acordo com o tipo de trabalho e a freqüência dos movimentos, os trabalhadores revezam de um posto de trabalho para outro ao longo de um período pré-determinado pelo departamento de medicina do trabalho. Isto promove a utilização alternada dos membros e músculos, permitindo o tempo necessário para o descanso dos músculos que não são solicitados.

[9] Figura fornecida por meio eletrônico (e-mail) pelo Eng. José Daniel Caruso, em janeiro de 2001.

2.5.2 Análise de ocupação de carga e transporte rodoviário

A quantidade de embalagens transportadas impacta diretamente nos custos de frete da empresa. Por isso, o estudo de ocupação de cargas ou estudo da economia de escala também se faz importante na fase de desenvolvimento da embalagem.

De acordo com Bowersox e David (1996), a economia de escala é o custo por unidade de peso, que é decrementado de acordo com o aumento ou otimização da carga, de modo que quanto mais se transporta, menor é o custo por unidade transportada.

Dessa forma, o projeto da embalagem também deve levar em consideração o aproveitamento máximo da ocupação da carreta do caminhão em caso de transporte rodoviário (Inter Plantas[10]). Para isto, a padronização das embalagens é altamente importante. A figura 2.13 mostra a otimização da carreta em função da padronização das embalagens.

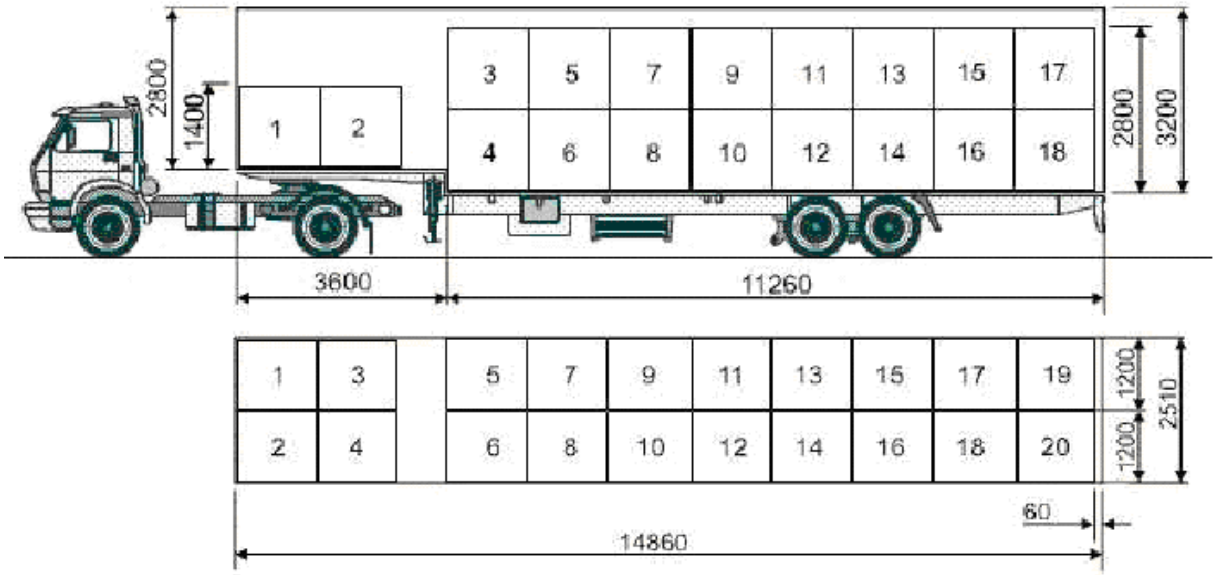


Figura 2.13 Volume de ocupação da carreta em função da dimensão da embalagem (DOCUMENTAÇÃO INTERNA, adaptado pelo autor)

Um caminhão pode transportar caixas de madeira, papelão, plásticas, tambores e outros tipos de materiais; desde que suas características físicas estejam dentro das restrições de capacidade do equipamento de transporte (MOURA, 1997).

[10] Inter Plantas é o termo utilizado pelo departamento de transporte desta montadora para caracterizar o transporte rodoviário entre suas fábricas.

A padronização das embalagens permite não só a padronização do equipamento de movimentação de materiais, mas também as facilidades e os métodos.

Segundo Moura (1997, p.24), “Existem programas que fornecem cálculo por computador, dimensões de embalagem que melhor se adaptam a um conjunto particular de condições de movimentação, transporte e estocagem”.

Outras vantagens da embalagem padronizada são: menor ocupação de áreas de depósito com embalagens vazias, redução do estoque e conseqüentemente do inventário e ganhos de juros financeiros devido à economia em material armazenado.

Embora a padronização da embalagem comprove sua eficácia, é importante salientar a dificuldade da sua padronização em função de um produto não padronizado.

No caso das peças acondicionadas em embalagens especiais a dificuldade de padronização é grande. Principalmente pela geometria particular de cada peça e as características das travas e separadores internos da embalagem. Muitas vezes a padronização se limita a comunização das embalagens entre as peças esquerdas e direitas, dianteiras e traseiras como: portas dianteiras esquerdas e direitas, portas traseiras esquerdas e direitas, laterais externos esquerdos e direitos e pára-lama esquerdos e direitos.

Mesmo com a característica particular do chamado *mirror*[11] entre estas peças, os mecanismos de travas e separadores internos destas embalagens precisam ser submetidos a uma série de testes para validação, pois o risco de um acondicionamento ineficiente é muito grande nestes casos.

Uma vez que as premissas de ergonomia e transporte rodoviário são contempladas no protótipo virtual da embalagem pode-se iniciar o processo de compra do protótipo físico. A etapa de desenvolvimento do protótipo virtual da embalagem pode ser concluída em um período de 30 dias.

2.6 Processo de aquisição do protótipo da embalagem

Finalizado o desenvolvimento do protótipo virtual da embalagem, os desenhos são transformados em arquivos de leitura do tipo PDF e encaminhados ao departamento de Compras da empresa por meio de sistema eletrônico, onde são submetidos à cotação pelos fornecedores via Internet como demonstrado no fluxograma da figura 2.14.

---

[11] *Mirror* é uma palavra do idioma inglês utilizada por esta filial de montadora que neste caso significa peças espelho.

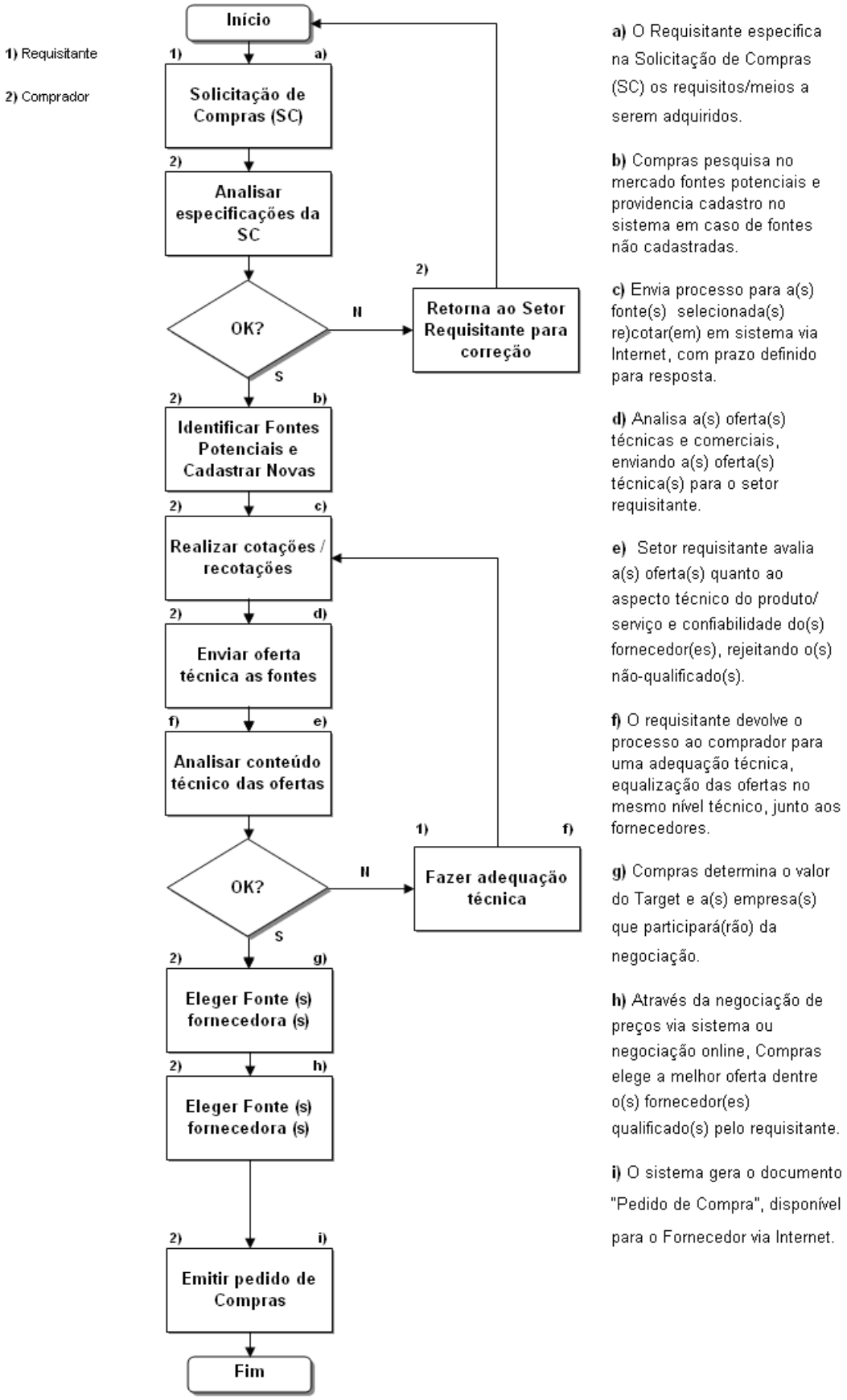


Figura 2.14 Processo de aquisição de meios e materiais não produtivos (DOCUMENTAÇÃO INTERNA, adaptado pelo autor)

O tempo desta etapa do processo está compreendido entre 60 e 90 dias.

2.7 Fabricação do protótipo

O fornecedor ganhador do processo de cotação fica responsável pelo pedido de compras. O processo de fabricação do protótipo da embalagem se inicia conforme desenhos disponibilizados e orientações do PFME ao fornecedor. O período médio para conclusão de um protótipo de embalagem é de 15 a 30 dias, de acordo com a complexidade e experiência do fornecedor.

2.8 Ensaio estático do protótipo da embalagem

O procedimento necessário para análise dos aspectos funcionais do protótipo da embalagem denomina-se ensaio estático. Neste procedimento, os principais tópicos descritos a seguir são observados:

- análise dos mecanismos funcionais do protótipo como travas, barras articuladas de travamento, separadores e estrutura de sustentação;
- condições ergonômicas de abastecimento das peças na embalagem;
- condições ergonômicas de retirada das peças da embalagem;
- condições ergonômicas de entrada e saída da embalagem;
- acondicionamento das peças na embalagem;
- análise do passo entre as peças acondicionadas;
- análise dos mecanismos de travamento das peças acondicionadas;
- análise do contato das peças com os separadores e demais áreas de contato da embalagem.

Pelo fato da embalagem possuir uma rigidez maior do que a rigidez das peças de superfície, não existe a preocupação de se analisar a deformação que a peça exerce sobre a embalagem, uma vez que neste tipo acondicionamento isto não ocorre. As peças são acondicionadas de forma separada, conforme já explicado na subseção 1.3, para evitar o contato entre as peças. Desta forma, a carga que o conjunto de peças exerce sobre a estrutura não provoca deformações na embalagem. Neste caso, o peso das peças de superfície não é relevante para a análise da embalagem.

Para o caso das embalagens de acondicionamento das peças internas apresentadas na subseção 1.3 este aspecto deve ser observado, uma vez que as peças são acondicionadas umas sobre as outras, formando um conjunto (ou pacote). Este tipo de acondicionamento permite que muitas peças sejam acondicionadas, e isto provoca uma deformação no tubo superior de acondicionamento, devido a uma maior concentração de carga formada pelo conjunto de peças. Esta deformação é eliminada com o aumento do diâmetro e da espessura do tubo, e através da inserção de reforços estruturais. Para este caso, o peso das peças internas é um fator que deve ser considerado na análise da embalagem.

Com base nestes tópicos, o PFME convoca novamente o time multifuncional para verificar de forma prática o funcionamento da embalagem. Para isto, se faz necessário uma quantidade mínima de peças para o ensaio, de forma a possibilitar a análise dos tópicos apresentados. Atualmente, a quantidade de peças adquiridas para análise de um protótipo de embalagem está entre 2 e 4 peças, isto, devido ao custo unitário de cada peça (a ser apresentado na tabela 3.1).

Cada responsável envolvido irá verificar se os pontos discutidos no FMEA foram contemplados na construção do protótipo. Eventuais sugestões e melhorias ainda podem ser identificadas nesta análise. Neste caso, o PFME e o fornecedor responsável investigam a viabilidade e possibilidade de executá-la. Em caso de impossibilidade, uma justificativa é transmitida ao grupo, que pode aceitar ou propor uma nova solução.

Uma vez analisado e eventuais melhorias executadas, o protótipo da embalagem é aprovado pelo grupo. Inicia-se, então, a fabricação do lote de embalagens que obedece às características físicas do protótipo aprovado. Esta fase é chamada de *buy-off*[12] , onde a embalagem é liberada para uso no setor de produção.

A quantidade de embalagens de um lote varia de acordo com as seguintes premissas de projeto:

- volume do veículo a ser produzido;
- capacidade de peças acondicionadas em cada embalagem;
- dias de estoque dentro da planta (*float*);
- dias de ordem de produção na estamparia (OP);
- distância entre os processos internos;
- em caso de transporte rodoviário o tempo necessário para o transporte;

[12] *Buy-Off* é uma expressão do idioma inglês utilizada por esta filial de montadora que para esta aplicação significa solução técnica.

- previsão de reserva técnica para absorver as embalagens que são retiradas do circulante para manutenção;
- peças de reposição;
- taxa de embalagens que são mantidas em estoques intermediários no processo (área de vasilhames, etc.).

A tabela 2.1 apresenta a necessidade de embalagens para um determinado veículo produzido na montadora.

Tabela 2.1 Lote de embalagens especiais para acondicionamento e transporte de peças de um determinado veículo produzido na montadora

Item	Embalagem	Dimensões externas							Premissas			Lote
		L	P(IA)	P(IF)	H	Hd	IA	IF				
		mm	mm	mm	mm	mm	pç/emb	pç/emb	JPD	Float	Taxas	Quant.
1	Tampa dianteira externa	1500	1800	1200	1135	1135	45	30	300	5	5%	35
2	Tampa dianteira interna	1500	1200	1200	1220	1220	160	160	300	5	5%	10
3	Tampa traseira externa	1400	1800	1200	1190	1190	36	24	300	5	5%	44
4	Tampa traseira interna	1300	1200	1200	1140	1140	120	120	300	5	5%	14
5	Porta dianteira externa esquerda 2P	1500	1800	1200	1490	1490	35	23	200	5	5%	30
6	Porta dianteira externa esquerda 4P	1500	1800	1200	1490	1490	35	23	100	5	5%	15
7	Porta dianteira externa direita 2P	1500	1800	1200	1490	1490	35	23	200	5	5%	30
8	Porta dianteira externa direita 4P	1500	1800	1200	1490	1490	35	23	100	5	5%	15
9	Porta dianteira interna esquerda 2P	1500	1200	1200	1415	1415	120	120	200	5	5%	9
10	Porta dianteira interna esquerda 4P	1500	1200	1200	1415	1415	120	120	100	5	5%	5
11	Porta dianteira interna direita 2P	1500	1200	1200	1415	1415	120	120	200	5	5%	9
12	Porta dianteira interna direita 4P	1500	1200	1200	1415	1415	120	120	100	5	5%	5
13	Porta traseira externa esquerda 4P	1400	1800	1200	1450	1450	36	24	100	5	5%	15
14	Porta traseira externa direita 4P	1400	1800	1200	1450	1450	36	24	100	5	5%	15
15	Porta traseira interna esquerda 4P	1400	1200	1200	1415	1415	120	120	100	5	5%	5
16	Porta traseira interna direita 4P	1400	1200	1200	1415	1415	120	120	100	5	5%	5
17	Lateral interno traseiro esquerdo 2P	1400	1200	1200	1620	1620	100	100	200	5	4%	11
18	Lateral interno traseiro direito 2P	1400	1200	1200	1620	1620	100	100	200	5	4%	11
19	Lateral externo esquerdo 2P	2900	1850	1200	1565	1565	16	9	200	5	4%	65
20	Lateral externo esquerdo 4P	2900	1850	1200	1565	1565	16	9	100	5	4%	33
21	Lateral externo direito 2P	2900	1850	1200	1565	1565	16	9	200	5	4%	65
22	Lateral externo direito 4P	2900	1850	1200	1565	1565	16	9	100	5	4%	33
23	Paralama esquerdo	2000	1200	1200	1415	1415	48	48	300	5	5%	33
24	Paralama direito	2000	1200	1200	1415	1415	48	48	300	5	5%	33
25	Teto	1350	1800	1200	2150	2150	29	19	300	5	2%	53
26	Longarina dianteira esquerda	2000	1200	1200	1100	1100	72	72	300	5	1%	22
27	Longarina dianteira direita	2000	1200	1200	1100	1100	72	72	300	5	1%	22

L largura da embalagem
P(IA) profundidade de embalagens que circulam entre alas
P(IF) profundidade de embalagens que circulam entre fábricas
H altura total da embalagem
Hd altura da embalagem dobrada
IA capacidade de peças acondicionadas na embalagem inter-alas
IF capacidade de peças acondicionadas na embalagem inter-fábricas
JPD volume da carros a serem produzidos por dia
Float dias de estoque
Taxas reservas técnicas

Fonte: documentação interna (adaptado pelo autor)

Ao término da entrega de todo o lote de embalagens, é realizado o *sign-off* [13]. Pendências técnicas ou entrega de documentação são finalizadas nesta fase do processo. O lote é oficialmente entregue ao setor de produção que a partir deste momento se torna responsável pelo uso e manutenção das embalagens.

O FMEA é disponibilizado ao setor de produção e atualizado de acordo com as reuniões realizadas nos fóruns de qualidade e melhoria contínua, para que novos problemas ou sugestões sejam considerados no próximo produto a ser desenvolvido pela empresa. A figura 2.15 mostra um protótipo de embalagem finalizado.

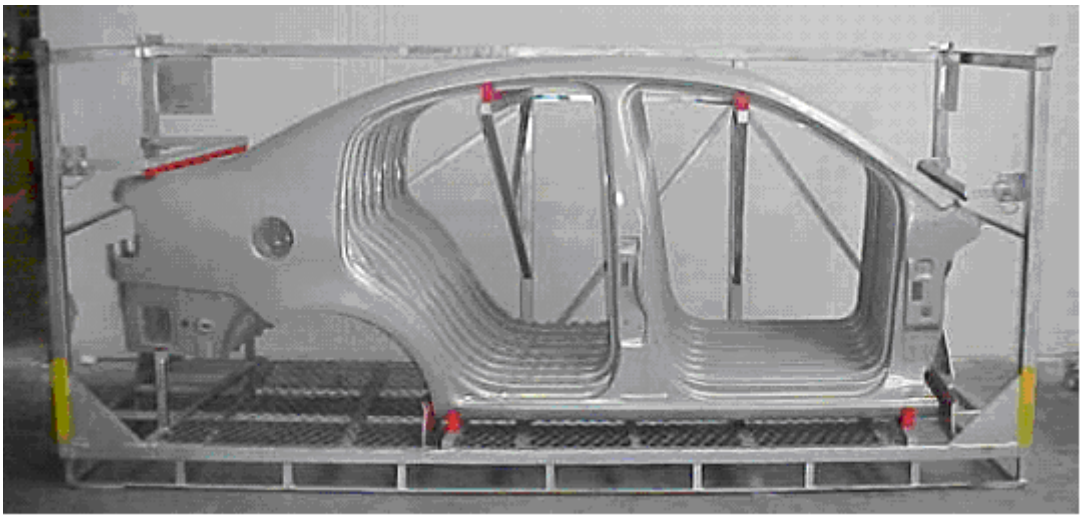


Figura 2.15 Protótipo de embalagem para acondicionamento e transporte de laterais externos (DOCUMENTAÇÃO INTERNA)

2.9 Análises e conclusões

Neste capítulo pode-se observar todo o processo de desenvolvimento do protótipo da embalagem. A definição e classificação das embalagens possibilitou a compreensão dos requisitos básicos necessários, importantes ao desenvolvimento das embalagens.

Dentro da sistemática de desenvolvimento da embalagem com o enfoque no “guarda chuva” de Moura (1997), o atual processo de desenvolvimento e aquisição das embalagens praticados por esta filial de montadora mostra sua similaridade, o que comprova sua eficiência.

[13] *Sign-Off* é uma expressão do idioma inglês utilizada por esta filial de montadora que para esta aplicação significa encerramento do processo.

A necessidade do desenho de produto para o desenvolvimento das embalagens no seguimento de PFME em tempo hábil para fabricação e entrega dos lotes das embalagens até a fase de início da série de teste de produção (PVS) é identificada na fase de desenvolvimento do primeiro protótipo virtual (VPT1), durante o processo de desenvolvimento do veículo nesta filial de montadora.

O FMEA tem importância fundamental como ferramenta de detecção e prevenção de falhas no desenvolvimento do projeto. Sua eficiência aumenta quando se reúne um time multifuncional, maximizando a visão do engenheiro responsável pelo desenvolvimento da embalagem.

Para simulação das condições de movimentação, cargas e esforços solicitantes, a aplicação do método dos elementos finitos (FEM) como ferramenta de análise e verificação estrutural possibilita obter soluções capazes de representar os fenômenos físicos reais, ajudando os engenheiros a prevenir e corrigir problemas ainda na fase de projeto.

De acordo com a pesquisa do instituto nacional de prevenção às LER/DORT (Lesões por Esforços Repetitivos ou Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho) o alto índice de problemas com trabalhadores submetidos a condições em que as atividades exigem movimentos e esforços repetitivos comprovam a importância do estudo da ergonomia .

A economia de escala ou estudo da ocupação de carga no transporte das embalagens é parte integrante deste processo. Com ele são obtidas melhores configurações de transporte da carga, o que reduz os custos por unidade transportada.

As vantagens da padronização das embalagens apresentadas indicam que quando possível, a padronização traz benefícios para todo o processo de movimentação, armazenagem e transporte das embalagens, bem como redução de custos com inventário e ganhos de juros financeiros.

O sistema de compras desta filial de montadora também mostra sua eficácia, permitindo o trâmite de documentos eletronicamente inclusive durante o processo de cotação junto aos fornecedores, internet.

A análise estática do protótipo da embalagem encerra o processo de desenvolvimento. Melhorias e sugestões são inseridas no projeto e consideradas na produção do lote de embalagens (*buy-off*). O processo de aquisição das embalagens é finalizado juntamente com a entrega da documentação técnica do processo (*sign-off*). As embalagens são definitivamente entregues ao setor de produção que se torna responsável pelo uso e manutenção das mesmas.

O ensaio estático do protótipo da embalagem deve ocorrer, em média, 6 meses antes da fase de pré-série (PVS) do lançamento do automóvel. Para isso, as peças protótipo devem

estar disponíveis para viabilizar a análise. Sem peças, não é possível realizar o ensaio do protótipo da embalagem, por isso, é fundamental ter a peça protótipo em tempo para a realização dos ensaios.

Outro aspecto importante é que para o ensaio das embalagens de acondicionamento de peças de superfície, o peso da peça protótipo não é relevante, uma vez que a embalagem apresenta maior rigidez quando comparada ao conjunto de peças acondicionadas na embalagem.

No capítulo seguinte, o processo de aquisição das peças protótipo, bem como sua aplicação no ensaio das embalagens de acondicionamento e transporte de peças de superfície serão apresentados.

3 A PEÇA PROTÓTIPO

De acordo com Tolstedt (2002), o sentido e uso do termo protótipo pode ser aplicado desde um desenho gerado em um simples guardanapo ou em um modelo completamente funcional construído em um ambiente planejado.

3.1 Processo de aquisição

O processo de aquisição das peças protótipo inicia-se logo após a aprovação do modelo de controle de dados (DKM/LH2) e da liberação B dos desenhos de produto (liberações de planejamento).

Para a aquisição das peças protótipo, o departamento de engenharia de protótipos centraliza os pedidos dos demais departamentos requisitantes da montadora que necessitam de peças protótipo e emite eletronicamente uma Solicitação de Compra (SC) ao departamento de compras que inicia o processo de cotação já demonstrado na subseção 2.6 deste trabalho.

Existem dois tipos de Solicitação de Compra (SC): o primeiro tipo de SC gera um pedido fixo. A principal característica do pedido fixo é que as entregas dos meios a serem comprados são fixas. Uma vez que as quantidades são fabricadas e entregues o pedido é encerrado. O pedido fixo tem um prazo de validade de 1 ano, podendo ser prorrogado por mais 4 meses.

O segundo tipo de SC gera um pedido do tipo *blanket*[14]. Neste pedido as entregas são realizadas mediante uma autorização de entrega (AE). O pedido *blanket* possui um prazo de validade de 3 anos.

Em grande parte dos processos, a engenharia de protótipos trabalha com pedidos do tipo *blanket*. O pedido *blanket* permite a engenharia de protótipos solicitar a fonte fornecedora os lotes de peças protótipo de acordo com as suas necessidades. No entanto, nem sempre os prazos são comuns entre os departamentos requisitantes de peças protótipo.

De uma maneira global, os departamentos que requisitam pequenos lotes de peças protótipo dependem da formação de um lote maior de peças para serem atendidos. Esta estratégia é centralizada na engenharia de protótipos, que requisita um maior número de peças, conforme exposto na subseção 3.2.

---

[14] *Blanket*: De acordo com Michaelis (2001) a palavra blanket pode ser entendida como um termo geral, que se aplica a todos. Neste caso, pode-se entender como um pedido capaz de abranger diversas atividades de engenharia como modelagem, usinagem, serviços de medição entre outros.

Após a emissão da SC, os prováveis fornecedores são definidos pelo departamento de compras e avaliados tecnicamente pela engenharia de protótipos com base nos seguintes critérios:

- qualificação técnica, capacidade de desenvolvimento e auto-suficiência na condução dos projetos;
- capacidade de reação quanto à mudança de escopo, prevendo alterações que possam ocorrer ao longo do projeto, evitando a troca da fonte fornecedora durante o andamento do projeto;
- prazo de fornecimento, o que garante o cumprimento dos cronogramas;
- qualidade de prestação de serviços, no atendimento, desenvolvimento do projeto e do produto final;
- volume de produção;
- histórico de pedidos anteriores, onde se pode observar com que freqüência o fornecedor é capaz de entregar e concluir os pedidos, se existe algum histórico de reclamação ou problemas comerciais anteriores.

Após análise técnica da engenharia de protótipos e a validação dos fornecedores de acordo com os critérios e premissas estabelecidos, o departamento de compras realiza uma nova negociação com as prováveis fontes fornecedoras somente para discutir as condições comerciais. Os fornecedores são definidos e os pedidos são colocados.

O departamento de engenharia de protótipos recebe o comunicado de compras sobre as fontes fornecedoras e os fornecedores iniciam os trabalhos de fabricação das peças protótipo. A figura 3.1 resume o funcionamento da sistemática.

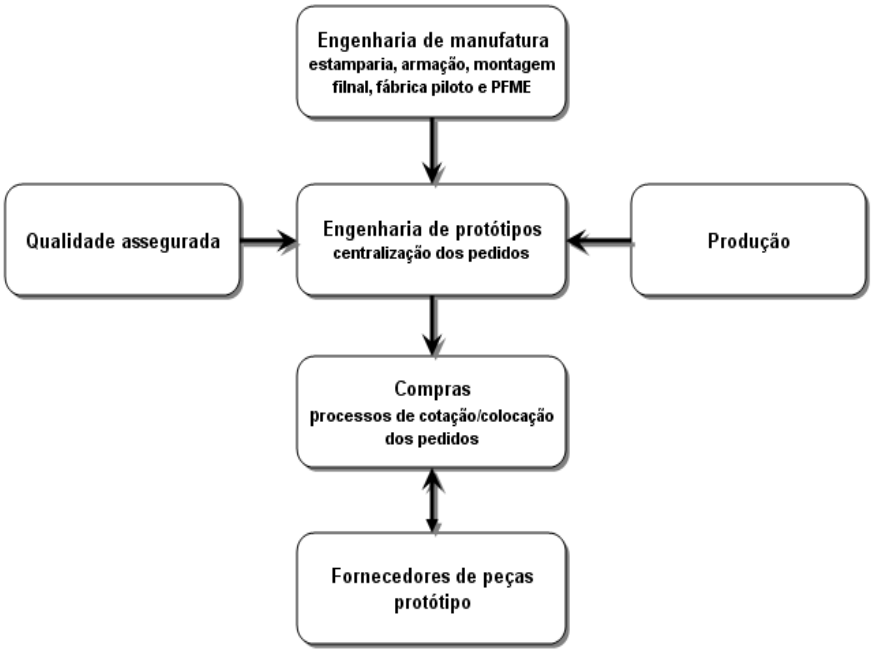


Figura 3.1 Sistemática atual de aquisição de peças protótipo da montadora

A sistemática de centralização de compra das peças protótipo através do departamento de engenharia de protótipos têm como principal vantagem o aumento do volume de peças protótipo a serem compradas e conseqüentemente uma maior redução no custo unitário de cada peça.

3.2 Quantidades e distribuição das peças protótipo entre os departamentos requisitantes

As peças protótipo são distribuídas entre os departamentos requisitantes da montadora em jogos, sendo que um jogo corresponde a 3 peças. Assim, para o desenvolvimento de um determinado veículo da montadora, as quantidades de peças protótipo estão distribuídas entre os departamentos da seguinte maneira:

- de 2 a 3 jogos para o departamento de Planejamento de Fluxo de Materiais e Embalagens (PFME);
- 1 jogo para o departamento de qualidade assegurada;
- 2 jogos para o departamento de fábrica piloto (engenharia de manufatura);
- de 5 a 16 jogos para o departamento de engenharia de protótipos.

Com isto, pode-se estimar uma quantidade aproximada de 60 peças para cada tipo de peça protótipo. Estas quantidades podem variar de acordo com o programa em desenvolvimento, o tipo da peça protótipo e os departamentos requisitantes. Com base no

desenvolvimento de um determinado veículo da montadora, a figura 3.2 mostra de forma gráfica a distribuição em quantidades de peças de superfície para cada departamento requisitante.

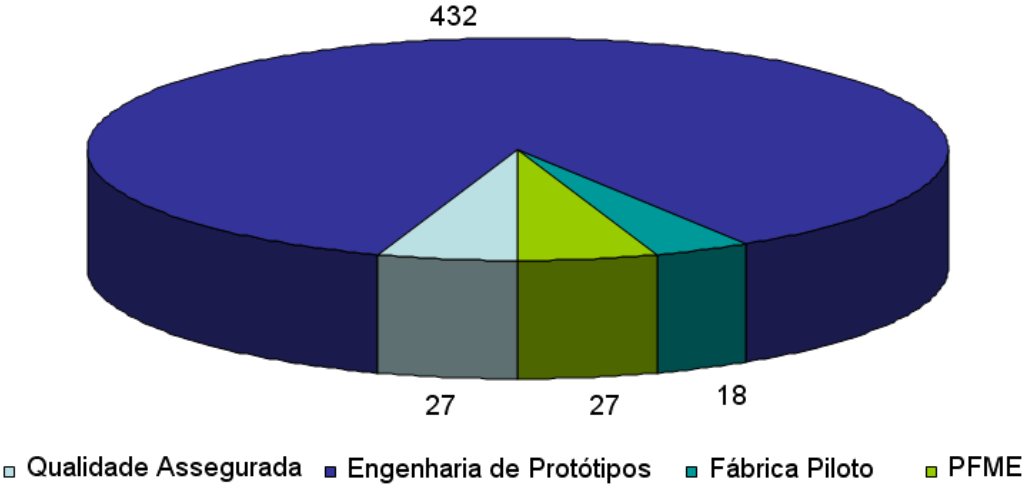


Figura 3.2 Distribuição das peças protótipo entre os departamentos requisitantes da montadora

3.3 Custos

Os custos com peças protótipo, fabricadas em chapa, para um determinado tipo de veículo no ano de 2006 nesta filial de montadora estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 3.1 Custos das peças protótipo

Peças protótipo				
Descrição	**tipo**	**modelo**	**custo unit.**	**custo p/ 3 jogos**
Laterais externos	superfície	Hatch Back	14.524,00	87.144,00
Laterais externos	superfície	Notch Back	14.634,00	87.804,00
Para-lamas	superfície	Notch/Hatch	6.224,40	37.346,40
Tampa dianteira externa	superfície	Notch/Hatch	5.310,00	15.930,00
Tampa dianteira interna	superfície	Notch/Hatch	5.169,60	15.508,80
Tampa traseira externa	superfície	Hatch Back	5.198,40	15.595,20
Tampa traseira interna	superfície	Hatch Back	4.650,00	13.950,00
Tampa traseira externa	superfície	Notch Back	5.421,60	16.264,80
Tampa traseira interna	superfície	Notch Back	4.870,00	14.610,00
Teto	superfície	Notch/Hatch	9.219,60	27.658,80
Portas dianteiras externas	superfície	Notch/Hatch	3.117,60	18.705,60
Portas dianteiras internas	superfície	Notch/Hatch	4.050,00	24.300,00
Portas traseiras externas	superfície	Notch/Hatch	3.117,60	18.705,60
Portas traseiras internas	superfície	Notch/Hatch	4.050,00	24.300,00
Reforço das colunas B	interna	Notch/Hatch	3.290,40	19.742,40
Reforço das soleiras	interna	Notch/Hatch	2.856,60	17.139,60
Assoalhos dianteiros	interna	Notch/Hatch	4.269,60	25.617,60
Longarinas dianteiras	interna	Notch/Hatch	4.708,80	28.252,80
Longarinas traseiras	interna	Notch/Hatch	5.036,40	30.218,40
Parede transversal inferior	interna	Hatch	1.811,52	5.434,56
Parede transversal inferior	interna	Notch	1.994,40	5.983,20
Total peças de superífice				**417.823,20**
Total peças de internas				**132.388,56**
Total geral				**R$ 550.211,76**

FONTE: DOCUMENTAÇÃO INTERNA, adaptado pelo autor

Um fator importante é que as peças adquiridas pelo PFME se destinam unicamente ao ensaio das embalagens. Após seu uso, geralmente são encaminhadas aos fornecedores dos protótipos das embalagens para auxiliar em eventuais correções ou ajustes. Devido às deformações plásticas que sofrem ao serem manuseadas, estas peças são invalidadas pelo departamento de qualidade assegurada para montagem no veículo ou para outras aplicações que exijam certo grau de confiabilidade dimensional.

3.4 Restrição quanto às fontes fornecedoras

Nem todos os fornecedores participantes do processo de cotação são contemplados com o pedido de fornecimento. Durante a etapa de análise das propostas (análise técnica) a engenharia de protótipos avalia a real possibilidade de fornecimento da fonte de acordo com o exposto na subseção 3.1.

Na maioria dos casos, o fornecedor envolvido no processo de cotação afirma cumprir um escopo do qual não é capaz, seja pelo volume de trabalho contido em sua carteira de

clientes ou pela qualificação técnica de realização, o que acarreta em atraso do desenvolvimento do projeto e custos adicionais de engenharia. Desta forma, o departamento requisitante, neste caso, a engenharia de protótipos, pode restringir o fornecimento a uma fonte fornecedora específica. Este processo é denominado de fonte restrita. Para isto, uma justificativa deve ser feita aos departamentos co-responsáveis pelo processo de compras (compras, engenharia, finanças, diretoria, etc.). Com esta etapa negociada o pedido de fornecimento é novamente colocado.

Nos últimos projetos desenvolvidos na montadora, o único fornecedor capaz de atender as demandas de produção e os prazos determinados encontra-se no Japão. Para trabalhos de menor proporção são utilizados fornecedores localizados no mercado doméstico.

3.5 Disposição

As peças protótipo devem estar disponíveis para uso em média 30 dias após a colocação dos pedidos de compras, que ocorre logo após a aprovação do modelo de controle de dados e do caderno de especificações 2 (DDKM/LH2) 19 meses antes do início da produção em série do automóvel (SOP) (KRUSCHWITZ; DUSKE, 2004). Neste período, os investimentos calculados pela engenharia de manufatura são aprovados e liberados, iniciando os trabalhos de instalações e compra de equipamentos necessários à produção em série do automóvel.

3.6 Atraso na disposição

A solicitação das peças protótipo ao departamento responsável (engenharia de protótipos) ocorre logo após a liberação B do produto (*Beschaffungsfreigabe*).

Neste mesmo instante, o PFME inicia o processo comercial de aquisição dos protótipos físicos das embalagens. Esta etapa tem uma duração aproximada de 60 dias.

Após a conclusão desta etapa se tem o início da construção dos protótipos físicos das embalagens. Conforme exposto na subseção 2.7 o tempo estimado para a construção de um protótipo de embalagem é de até 30 dias.

Com isto, o tempo necessário para aquisição e fabricação de um protótipo físico de embalagem é de 90 dias.

A disponibilidade da peça protótipo deve ocorrer antes ou logo após a construção do protótipo da embalagem. No entanto, após a construção do protótipo físico da embalagem, o atraso na disponibilidade das peças protótipo pode chegar a 90 dias.

Em análise ao exposto, pode-se concluir que, o tempo total, desde a solicitação até o lograr da peça protótipo é de 180 dias.

O tempo identificado para obtenção das peças protótipo está relacionado à estratégia do departamento de engenharia de protótipos para formação de um lote maior de peças protótipo.

Este lote é composto por peças dos demais departamentos requisitantes, conforme exposto na subseção 3.1. Após a formação deste lote, a engenharia de protótipos informa a fonte fornecedora que inicia o processo de fabricação das peças protótipo.

Aliado a isto, outro fator que contribui para a extensão deste tempo é a localização da fonte fornecedora.

Atualmente, a fonte fornecedora existente capaz de atender os volumes de peças protótipo descritos na subseção 3.2 encontra-se no Japão, onde o tempo médio de uma viagem marítima para o Brasil é de 45 dias.

Assim, a formação de um grande lote de peças protótipo reduz os custos de frete com o transporte. O cronograma mostrado na figura 3.3 é parte integrante da documentação do processo de aquisição de protótipos de embalagens para um determinado programa desenvolvido nesta filial de montadora. Na linha 75 do cronograma, pode-se observar o atraso fazendo um comparativo entre o evento previsto e o realizado.

Planejamento de Desenvolvimento de Programas - Engenharia de Manufatura

Programa: VW 22X FACELIFT **BEA:** 700
PAR: 70.733 **Itens:** 0014
Área: EMBALAGENS MAKE

Liberação "P" 15 / 12 / 2003
Liberação "B" 25 / 01 / 2004

PVS de 24/01/05 a 24/02/05
SO de 18/04/05 a 18/05/05
SOP 7/11/2005

Legenda: Previsto, Revisado, Realizado

"Milestones" do Programa: Aprov. Progr. | Lib. P | Lib. B | Lib. Fundos | PVS | SO | SOP | 90 dias após SOP

Item	Ações Principais	Responsável	Status %
30	Obtenção de informações do volume técnico	Planej. Fab.	100%
35	Planejamento	Planej. Fab.	100%
40	Elaboração de lista de meios	Planej. Fab.	100%
60	Análise tecnica de FMEA´s	Planej. Fab.	100%
70	Elaboração de FMEA´s	Planej. Fab.	-
75	Peças Protótipos (1X)	Planej. Fab.	100%
80	Elaboração de Memorial Descritivo / Emissão de SC´s	Planej. Fab.	100%

Figura 3.3 Cronograma do planejamento de aquisição de embalagens desta filial de montadora (DOCUMENTAÇÃO INTERNA, adaptado pelo autor)

Em situações de emergência as peças podem ser enviadas em transporte aéreo, porém, os custos de frete são elevados quando comparados aos custos de frete marítimo.

Estes atrasos influenciam nas demais fases do planejamento de aquisição dos lotes de embalagens e em alguns casos comprometem o início da série de teste da produção do veículo (PVS).

Para evitar que isso aconteça na fase de produção em série do veículo, algumas medidas paliativas são tomadas como: utilização de embalagens descartáveis, embalagens existentes com adaptações, estruturas metálicas provisórias e em último caso acomodações no chão sobre papelão ou outro material.

Todas essas medidas vão a desacordo com o departamento de qualidade assegurada, pois o mau acondicionamento das peças provoca alterações dimensionais, amassamentos e defeitos de superfície nas peças.

Para o departamento de segurança do trabalho, as soluções paliativas provocam condições inseguras de trabalho, o que coloca em risco a saúde e a integridade física dos operadores.

Sob o aspecto do transporte, embalagens inadequadas também oferecem condições inseguras, as peças podem se soltar das embalagens devido ao mau acondicionamento, podendo cair nas estradas em caso de transporte rodoviário, o que resultaria em sérios acidentes e infrações governamentais.

3.7 Aplicação da peça protótipo no desenvolvimento da embalagem

Durante a avaliação do protótipo físico da embalagem se faz necessário algumas peças para realização dos ensaios. Porém, na fase de liberação para planejamento (liberação B) as peças ferramentadas ainda não estão disponíveis para uso, sendo assim, o PFME compra de acordo com o exposto na subseção 3.1 uma quantidade mínima de peças protótipo para utilização. Estas peças devem possuir as mesmas propriedades físicas da peça ferramentada. Para o processo de desenvolvimento de embalagens, as peças protótipo devem atender os seguintes atributos:

- a dimensão das peças deve obedecer as informações contidas no desenho de produto;
- precisão dimensional;
- garantir a repetibilidade dimensional entre as peças do lote;

- resistência mecânica que permita o manuseio para simular as condições de acondicionamento, abastecimento e retirada das peças da embalagem.

No caso da peça protótipo física possuir uma geometria incompatível com a especificada no desenho, isto resultaria no desenvolvimento errado da embalagem, o que seria detectado somente no acondicionamento das peças ferramentadas, ou peças de série.

Quanto a repetibilidade das peças do lote, é fundamental que não ocorra variações dimensionais entre as peças. Isto dificultaria a identificação de qual peça possui as dimensões especificadas no desenho de produto.

Desta forma, é muito importante que as peças protótipo sejam certificadas dimensionalmente antes de sua aplicação no processo de desenvolvimento das embalagens.

A resistência mecânica é igualmente importante, pois as peças protótipo são manuseadas desde a construção do protótipo físico da embalagem até a realização do ensaio estático.

O material construtivo utilizado atualmente pelas fontes fornecedoras para fabricação das peças protótipo é o aço, similar ao utilizado na fabricação das peças de série.

Para as peças utilizadas no ensaio estático dos protótipos de embalagens o tipo de material utilizado na fabricação destas peças não é relevante, desde que o material atenda os atributos descritos no início desta subseção.

A aplicação destas peças no desenvolvimento do protótipo da embalagem também possibilita a verificação física dos potenciais de falha discutidos no protótipo virtual e no FMEA conforme subseções 2.4 e 2.5.

A figura 3.4 apresenta a análise das características do passo entre as peças de um protótipo da embalagem. Nesta condição, verifica-se a distância entre as peças, o potencial de amassamento na posição de acondicionamento durante a retirada e colocação das peças.

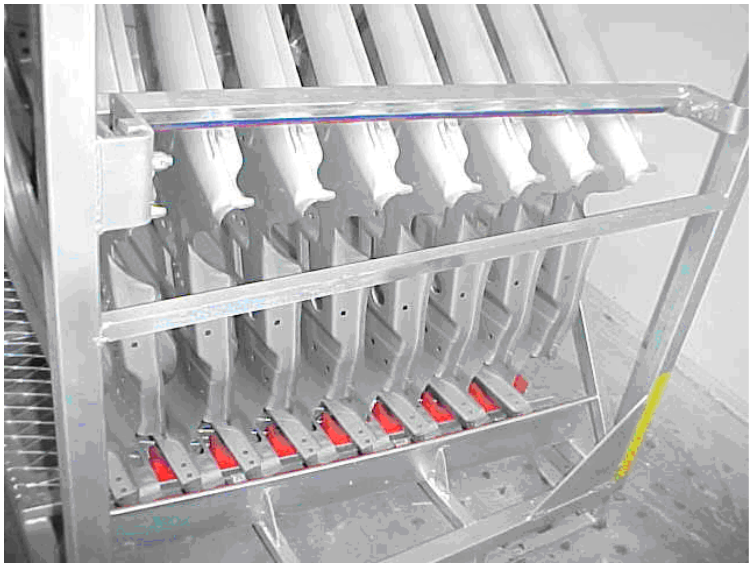


Figura 3.4 Análise do passo com as peças acondicionadas: proximidade entre as peças e potencial de amassamento das peças (DOCUMENTAÇÃO INTERNA)

A figura 3.5 mostra a região de contato da barra de travamento das peças na embalagem. O objetivo desta análise é verificar a possibilidade de esmagamento das peças em função da pressão exercida pela barra. Pode-se observar uma pequena deformação do revestimento da barra (azul e laranja). Construída em material de menor densidade, esta deformação proposital contribui para o perfeito assentamento das peças na barra de travamento.

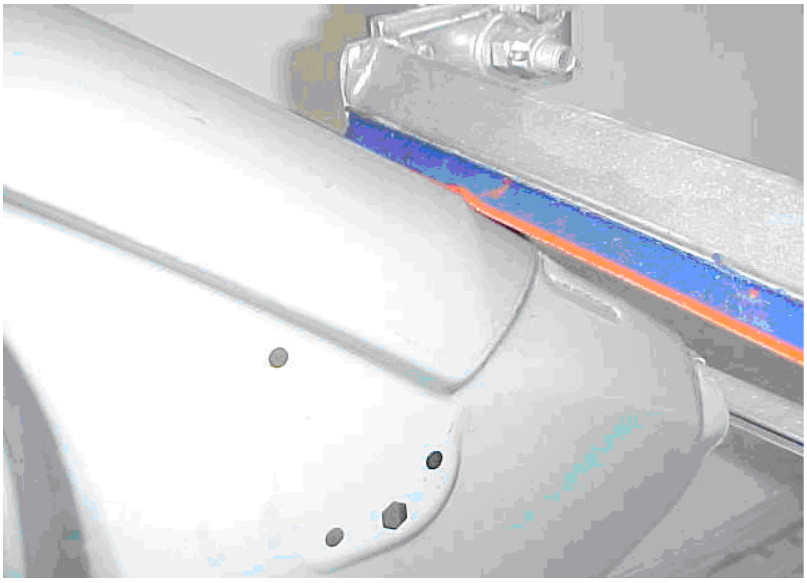


Figura 3.5 Análise do contato da barra de travamento com as peças (DOCUMENTAÇÃO INTERNA)

A figura 3.6 mostra o faceamento dos separadores de poliuretano com o perfil das peças. Nesta análise verifica-se a homogeneidade entre os separadores quanto o aspecto

fabril, dureza, capacidade de faceamento com o perfil das peças, capacidade de repetibilidade do molde e coloração.

Figura 3.6 a) separadores superiores. b) separadores inferiores. c) detalhe de apoio do flange inferior das peças (DOCUMENTAÇÃO INTERNA, adaptado pelo autor)

A figura 3.8 mostra as condições ergonômicas de manuseio das peças na embalagem.

Nesta análise são verificados os movimentos do operador, altura de elevação dos braços em relação aos ombros, posição da coluna cervical, os esforços e outros movimentos. Do aspecto de segurança do trabalhador são observados: condições de entrada e saída da embalagem, travas, cantos vivos e a aderência do piso da embalagem.

Figura 3.7 Análise ergonômica e aspectos de segurança do trabalhador (DOCUMENTAÇÃO INTERNA)

Por ser uma peça de grande dimensão, o departamento de segurança do trabalho e o departamento de medicina ocupacional exigem que as peças sejam manuseadas por dois operadores.

Embora o peso da peça seja um fator determinante sob o aspecto ergonômico, para o caso da análise da embalagem o peso da peça não é um fator relevante, conforme já exposto na subseção 2.8.

3.8 Análises e conclusões

Neste capítulo pode-se observar todo o processo de aquisição e aplicação das peças protótipo no ensaio das embalagens.

A estratégia de centralização do processo de aquisição das peças protótipo pelo departamento de engenharia de protótipos têm como vantagem principal a redução dos custos unitário e global das peças.

O problema de atraso na obtenção das peças protótipo apresentado conforme o exposto na subseção 3.6, evidencia o problema de tempo de aquisição destas peças. No entanto, a variação de tempo mostrada no cronograma da figura 3.3 não pode ser considerada como um comportamento padrão para todos os programas desenvolvidos na montadora.

De acordo com o programa a ser desenvolvido, estes atrasos podem ser maiores ou menores, em função do processo de compras ou do produto em desenvolvimento.

Os investimentos em peças protótipo praticados atualmente nesta filial de montadora servem de comparativo para os custos que serão apresentados no capítulo 7 deste trabalho.

A aplicação das peças protótipo na fase de avaliação do protótipo físico da embalagem mostra sua importância. Mesmo com o desenvolvimento do protótipo virtual da embalagem e as premissas consideradas no FMEA, a análise física possibilita ao time multifuncional verificar se os pontos previstos no desenvolvimento virtual do protótipo atendem as condições normais de trabalho.

A utilização destas peças possibilita ainda aos responsáveis dos departamentos de medicina ocupacional e segurança do trabalho avaliar a condição ergonômica dos trabalhadores, fator indispensável na aprovação final do protótipo da embalagem.

Os atributos apresentados na subseção 3.7 são importantes e devem ser considerados na fabricação das peças protótipo utilizadas no ensaio estático das embalagens, caso isto não ocorra, todo o processo de desenvolvimento do protótipo físico da embalagem pode ser

comprometido, ocasionando atrasos com a correção do protótipo e conseqüentemente atrasos nas fases posteriores do processo de aquisição das embalagens.

No capítulo 4 os processos de prototipagem rápida (RP) disponíveis no mercado doméstico serão apresentados. No final do capítulo será realizada a identificação dos processos que melhor atendem os requisitos necessários para fabricação das peças protótipo conforme descrito na subseção 3.6 deste capítulo.

De forma análoga ao capítulo 4, no capítulo 5 os processos de ferramental rápido (RT) disponíveis no mercado doméstico serão apresentados, e os processos que melhor atendem os requisitos descritos na subseção 3.7 também serão identificados.

4 PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Kai, Jacob e Mei (1997) definem a *Rapid Prototyping* (RP) – Prototipagem Rápida (RP) como um processo que produz peças camada por camada diretamente de um modelo gerado em CAD.

Para Pham e Gault (1998), a RP é como um grupo de novas tecnologias para produção precisa de peças diretamente dos modelos de CAD em algumas horas, com a mínima necessidade de intervenção humana.

Kaminski (2000) define a RP como uma tecnologia que produz modelos físicos a partir de modelos tridimensionais de sistemas CAD e que compõe os modelos a partir de materiais básicos depositados em camadas subseqüentes cujo contorno é obtido diretamente destes sistemas.

Upcraft e Fletcher (2003) definem a RP como sendo um termo genérico para um número de tecnologias que disponibilizam componentes sem a necessidade de fabricação de ferramental em um primeiro momento, ou sem a necessidade de prototipadores.

Volpato et al (2007) definem a RP como um processo de fabricação através da adição de material em forma de camadas planas sucessivas, permitindo fabricar componentes físicos em três dimensões (3D) com informações obtidas diretamente do modelo geométrico gerado no sistema CAD, de forma rápida, automatizada e totalmente flexível.

Desta forma, a prototipagem rápida pode ser descrita como um conjunto de tecnologias que utilizam o princípio de sobreposição de camadas de um determinado material, a partir das informações matemáticas de um modelo gerado em sistema CAD, de forma a compor o produto final, conforme as necessidades de uso e aplicação.

4.1 Classificação dos processos de prototipagem rápida (RP)

Segundo Kruth (1991) apud Pham e Gault (1998) as tecnologias de RP podem ser classificadas basicamente em tecnologias que envolvem adição de material e remoção de material.

Chua, Chou e Wong (1998) classificam as tecnologias de RP em quatro áreas fundamentais: inserção de dados (input), métodos, materiais e aplicações.

Johnson (1994) apud Chua, Chou e Wong (1998) classifica os processos de RP de acordo com o controle de fabricação das camadas que compõem o produto final (peça) através

da interação da massa de matéria prima (*m*) e da energia (*W*) que produz a camada física com a variação da potência conforme mostra a equação 4.1.

$$\delta(mW) = m\delta W + W\delta m \qquad (4.1)$$

Na eq. (4.1) $\delta(mW)$ é o processo com massa *m* uniforme seletivamente ativada, removida ou colada por uma energia variável δW controlada pela descrição da camada.

O componente $m\delta W$ representa o processo que controla a variação de massa δm através do controle de energia *W*, conforme as informações sobre a camada de material a ser depositado.

Kochan e Chua (1995) apud Oliveira (2001) classificam os processos de RP de acordo com o estado inicial do material e o do método. Os processos são agrupados em sólidos, líquidos e na forma de pó. Dentro de cada grupo, os processos de RP são classificados em diferentes métodos: feixe de laser simples ou feixe de laser duplo, lâmpada, cortar e juntar, iluminação mascarada, fundir e solidificar, juntar, colar e holografia.

Upcraft e Fletcher (2003) classificam a RP de acordo com os processos descritos a seguir.

- *Curing process.* Um polímero foto sensível é exposto a uma fonte de luz de forma a endurecê-lo;
- *Sheet process*. Lâminas de papel são cortadas em folhas de pequena espessura para moldar e empilhar umas sobre as outras;
- *Dispensing process.* O material é derretido e então depositado como um filamento quente ou como gotejamento quente e individual;
- *Sintering process.* O material a base de pó é sinterizado utilizando uma fonte de calor, normalmente um feixe laser;
- *Binding process.* Uma liga liquida é depositada juntamente sobre um determinado material na forma de pó.

4.2 Processos de prototipagem rápida

De acordo com uma pesquisa realizada em 1999 foram identificados aproximadamente 40 diferentes tipos e aproximações entre os processos de RP (UPCRAFT; FLETCHER, 2003). Alguns destes processos foram estabelecidos como principais e outros

ainda a serem desenvolvidos. Estes processos foram apresentados por Upcraft e Fletcher (2003) de acordo com a seguinte relação.

3DP	*Three-Dimensional Printing*
3DWM	*Three-Dimensional Welding and Milling*
BPM	*Ballistic Particle Manufacture*
CAM-LEM	*Computer Aided Manufacturing – Laminated Engineering Materials*
CC	*Contour Crafting*
CLOM	*Curved Laminated Object Manufacturing*
DLF	*Direct Light Fabrication*
DLMS	*Direct Laser Material Sintering*
ECLD-SFF	*Electrochemical Liquid Deposition Of Semi-solid Metals*
EFF	*Extrusion Freeforming*
EPDFF	*Electrophotographic Powder Deposition for Freeform Fabrication*
FDC	*Fused Deposition of Ceramics*
FDM	*Fused Deposition Modelling*
FDMet	*Fused Deposition of Metals*
FFF	*Fast Freeform Fabrication*
FI	*Fast Inkjet*
GMAW	*Gas Metal Arc Welding*
LCRHLS	*Local Chemical Reaction Heat by Laser Scanning*
LCVD	*Laser Chemical Vapour Deposition*
LDM	*Laser Diode Manufacturing*
LENS	*Laser Engineering Net Shape*
LM	*Layered Manufacture*
LML	*Laser Microchemical Lathe*
LOM	*Laminated Object Manufacturing*
M2SLS	*Multimaterial Selective Laser Sintering*
Meso SDM	*Mesoscopic Shape Deposition Manufacturing*
Mold SDM	*Mold Shape Deposition Manufacturing*
PLD	*Pulsed Laser Deposition*
PPD	*Pointwise Powder Deposition*
RFP	*Rapid Freeze Prototyping*
RBC	*RoboCasting*

RPBPS	*Rapid Pattern Based Powder Sintering*
RSLA	*Refrigerative Stereolithpgraphy*
SALD	*Selective Area Laser Deposition*
SADVI	*Selective Area Laser Deposition and Vapour Infiltration*
SGC	*Solid Ground Curing*
SL	*Stereolithography*
SLPR	*Selective Laser Powder Remelting*
SLS	*Selective Laser Sintering*
TIF	*Temperature Induced Forming*
TLP	*Thick Layer Prototyping*
WFDM	*Wirefeed Direct Metals*

De acordo com Silva e Kaminski (2007), os processos de RP descritos a seguir, foram selecionados de acordo com a tecnologia disponível no mercado nacional e estão classificados em três grupos: materiais líquidos, sólidos e a base de pó. Outros processos também são mostrados no Apêndice C deste trabalho, porém, até o presente momento, não possuem representantes no Brasil.

No grupo dos materiais líquidos estão os processos de estereolitografia (SL), impressão a jato de tinta (IJP) “PolyJet” e impressão a jato de tinta (IJP) “InVision”.

No grupo dos materiais sólidos encontram-se os processos de modelagem por fusão e deposição (FDM) e a impressão a jato de tinta (IJP) “ThermoJet”.

No grupo dos materiais a base de pó estão os processos de sinterização seletiva a laser (SLS), sinterização a laser (“EOSINT” e a impressão tridimensional (3DP).

4.3 Processos baseados em líquido

4.3.1 Estereolitografia (SL)

A *StereoLithography* (SL) – Estereolitografia (SL) “[...] foi o primeiro processo de prototipagem disponível comercialmente, sendo apresentado ao mercado em 1988 na feira US Autofact, pela empresa 3D Systems Inc. dos EUA” (VOLPATO et al, 2007). A empresa que possui esta tecnologia no Brasil é a Robtec.

A SL pode ser utilizada para construir peças com geometrias complexas e com acabamento superficial comparável as várias formas construtivas convencionais (UPCRAFT; FLETCHER, 2003).

4.3.1.1 Método da estereolitografia

O princípio deste processo baseia-se na transformação de uma resina composta por monômeros fotossensíveis que se transformam em cadeias poliméricas[15] e se solidificam ao ficarem expostos a um feixe laser, geralmente ultravioleta (UV), com comprimento de onda específico.

Esta resina está acondicionada em um recipiente que compõe o aparato de estereolitografia. Na parte interna deste recipiente, existe uma plataforma móvel que se desloca para cima e para baixo, de forma a expor uma quantidade da resina fotossensível ao feixe laser que a solidifica.

De acordo com Volpato et al (2007) o laser utilizado nos equipamentos de SL é do tipo Hélio-Cádmio (He - Cd) com potência que pode variar de 6mW até 12mW. O comprimento de onda é de 325 mm.

Também se pode utilizar o laser de Nd: YVO_4 no estado sólido, com potência que pode variar de 100 mW a 800 mW e comprimento de onda de 354,7 mm.

Seu diâmetro está em torno de 0,25mm, porém, para aplicações que requerem alta resolução, este diâmetro pode ser reduzido para 0,075 mm.

Um par de espelhos movimentados por galvanômetros[16] conduz o feixe laser. Um conjunto de lentes e um sistema de abertura calibram o feixe laser que percorre a superfície da resina líquida fotossensível.

Após a solidificação da primeira camada, a plataforma móvel submerge e imerge novamente na resina repetindo o processo até que as camadas subseqüentes sejam solidificadas compondo assim o produto final de baixo para cima, a partir das secções transversais da peça obtidas pelo fatiamento do modelo 3D gerado a partir do sistema CAD.

---

[15] Segundo Guitián (1994) “Polímero é um composto químico de peso molecular elevado, formado por muitas moléculas pequenas iguais, chamadas monômeros (do grego monos = um), unidas umas a outras por ligações covalentes, resultantes de muitas reações de adição consecutivas”.

[16] De acordo com Ferreira (2004) a palavra galvanômetro pode ser entendida como um instrumento com que se medem pequenas correntes, ou pequenas tensões, baseado na deformação que forças eletromagnéticas provocam num sistema mecânico elástico, e geralmente oscilante.

A espessura da camada é geralmente mantida constante ao longo de toda a peça, variando entre 0,025-0,5mm.

A peça finalizada é então removida do recipiente e levada a um forno UV para cura total da resina, aumentando sua resistência mecânica. Em caso de necessidade, um acabamento superficial é realizado manualmente para retirada do excesso de material ou melhora do aspecto superficial do produto.

Para peças de geometrias complexas onde existam partes que possam se soltar ou flutuar na resina durante o processo de fabricação, o sistema computacional de planejamento do processo que acompanha o equipamento do RP gera automaticamente suportes ou apoios que, posteriormente, possam ser removidos da peça acabada. A figura 4.1 apresenta o conceito desta tecnologia.

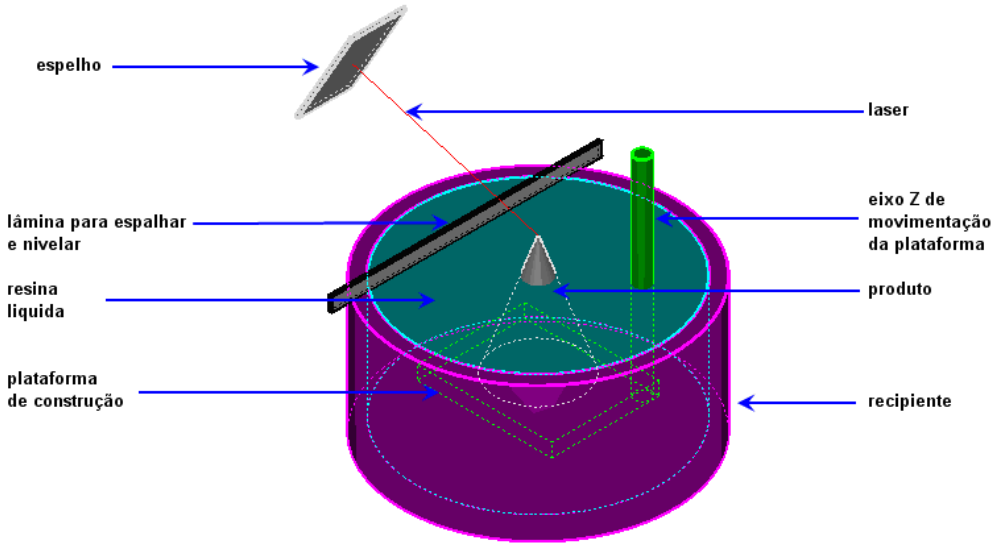


Figura 4.1 Princípio do processo de SL

4.3.1.2 Materiais disponíveis

De acordo com Volpato et al (2007) os materiais fotocuráveis atualmente disponíveis no mercado são resinas à base de acrilatos ou epoxy, sendo que a maior parte das resinas utilizadas é a base de epoxy devido à menor contração e as melhores propriedades mecânicas e térmicas. Uma desvantagem da resina epoxy em relação à acrílica é devido ao fato de que a resina epoxy requer maior energia para polimerização, impactando em maior tempo de processamento para uma mesma potência do laser.

4.3.1.3 Vantagens da estereolitografia

Pham e Gault (1998) destacam como principais vantagens da SL a produção e o acabamento superficial dos objetos.

Upcraft e Fletcher (2003) destacam a possibilidade de se produzir objetos de geometria complexa e boa precisão geométrica.

A empresa Robtec (2007) também destaca algumas vantagens da SL:

- alta resolução;
- alta velocidade de construção;
- laser com maior vida útil;
- versatilidade do sistema;
- serviço com suporte mundial.

4.3.1.4 Desvantagens da estereolitografia

As desvantagens apresentadas por Pham e Gault (1998) são os custos do material, o odor tóxico nocivo ao operador e a proteção contra luz para evitar a polimerização prematura.

Upcraft e Fletcher (2003) identificam entre outras desvantagens a deformação das peças, principalmente às produzidas em resina acrílica.

Volpato et al (2007) ainda destacam:

- a necessidade de suportes em regiões não conectadas, utilizando para isso o mesmo material de construção do produto;
- a necessidade do pós-processamento para remoção dos suportes;
- o requerimento de pós-cura para completar o processo de polimerização e assegurar a integridade estrutural do produto;
- a restrição de materiais para utilização, limitando o processo ao uso de resinas poliméricas.

4.3.2 Impressão a jato de tinta (IJP) “PolyJet”

De acordo com a empresa Objet (2007), a “PolyJet” Inkjet é uma tecnologia patenteada da empresa que trabalha com a injeção de material fotopolimérico em camadas ultra-finas (16μ) depositadas sobre uma plataforma de construção. Um software intuitivo

(Objet studio[tm]) administra o processo de fabricação. As empresas representantes desta tecnologia no Brasil são a Artis Prototipagem e a Máquinas Kehl.

Cada camada é imediatamente fotocurada por uma luz ultravioleta logo após a sua deposição sobre a camada de construção. O processo não requer pós-cura e o produto pode ser utilizado imediatamente após a sua fabricação.

4.3.2.1 Método da impressão a jato de tinta "PolyJet"

A IJP "PolyJet" utiliza um sistema de jato de tinta para deposição da resina em pequenas gotas sobre uma bandeja. Após a deposição do material, uma luz UV é lançada para cura da camada. A figura 4.2 mostra de forma esquemática o princípio de funcionamento deste processo.

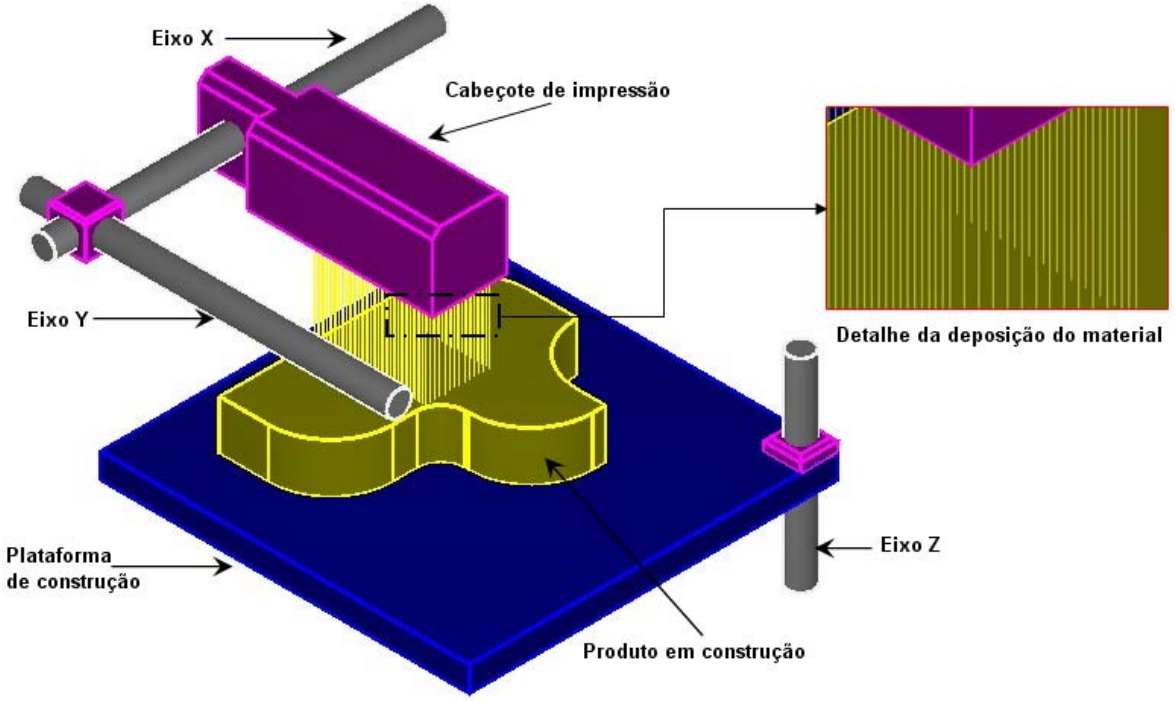


Figura 4.2 Princípio do processo de IJP

4.3.2.2 Materiais disponíveis

Dois tipos diferentes de materiais são utilizados para fabricação. Uma resina para o produto e um material tipo gel fotocurável para o suporte. Ao final do processo, o material do suporte é removido com um jato de água misturado com um componente proprietário ou manualmente.

A resina é totalmente curada durante o processo de deposição, não havendo necessidade de pós-cura do produto. De acordo com o fabricante Artis (2007), o equipamento pode ser utilizado em ambiente de escritório, pois as resinas utilizadas vêm em cartuchos selados e as peças são totalmente curadas durante o processo, evitando o contato do operador com o material.

Ainda segundo o fabricante, uma grande variedade resinas dentro da família *FullCure* inclui propriedades transparentes, coloridas, opacas, flexíveis e rígidas além de possibilitar aos modelos ajustes de forma e função de acordo com as necessidades do produto.

4.3.2.3 Vantagens da impressão a jato de tinta "PolyJet"

O fabricante Artis (2007) apresenta os seguintes tópicos como vantagens do processo:

- alta qualidade e resolução (16µ);
- obtenção de partes lisas, precisas e altamente detalhadas;
- alta precisão. A saída precisa do jato possibilita a obtenção de detalhes e produtos com paredes de pequena espessura (600µ ou menos dependendo em geometria e materiais utilizados);
- uso do equipamento em ambiente de escritório;
- processo rápido devido à alta velocidade de construção;
- não requer pós-cura do material.

4.3.2.4 Desvantagens da impressão a jato de tinta "PolyJet"

Volpato et al (2007) apresentam as seguintes deficiências ou desvantagens deste processo:

- necessidade de suporte em regiões não conectadas do produto;
- pós-processamento para remoção dos suportes;
- poucos materiais disponíveis para obtenção de protótipos, limitando o uso apenas às resinas poliméricas.

4.3.3 Impressão a jato de tinta (IJP) “InVision”

De acordo com o representante do fabricante no Brasil (Robtec), a “InVision” é uma impressora 3D que produz modelos precisos com alta precisão através do uso de materiais fotopoliméricos duráveis. A tecnologia de impressão 3D “InVision” pertence à família *Multi-Jet Modeling*.

A *Multi-Jet Modeling* (MJM) também pertence à classe conhecida como *concept modeller* (modelador conceitual). A técnica da MJM tem sido associada às impressoras 3D e é projetada para permitir ao grupo de desenvolvimento de projeto o rápido acesso a aceitação geométrica do modelo em material que normalmente não seria utilizado para o produto final (UPCRAFT; FLETCHER, 2003).

Também de acordo com o representante Robtec, a “InVision” é uma impressora 3D que oferece vantagens fundamentais comparada a outras tecnologias de RP. Esta tecnologia produz modelos com alta precisão utilizando materiais fotopoliméricos duráveis. Obtém-se bom acabamento superficial e grande nível de detalhamento possibilitando a obtenção de modelos extremamente complexos.

4.3.3.1 Método da impressão a jato de tinta “InVision”

O material é depositado na forma de pequenas gotas, similar ao processo de uma impressora jato de tinta. Após a deposição do material sobre a plataforma de construção, uma luz UV é aplicada sobre a mesma realizando a cura do material. Este processo também necessita de suportes para unir as regiões desconectadas da peça.

De acordo com Upcraft e Fletcher (2003) os equipamentos disponíveis no ano de 2003 possuíam cerca de 96 jatos de tinta que podiam ser acionados simultaneamente.

Segundo Volpato et al (2007) os equipamentos atualmente disponíveis no mercado utilizam um cabeçote com capacidade para 352 jatos de tinta.

A figura 4.3 ilustra o princípio de funcionamento deste processo.

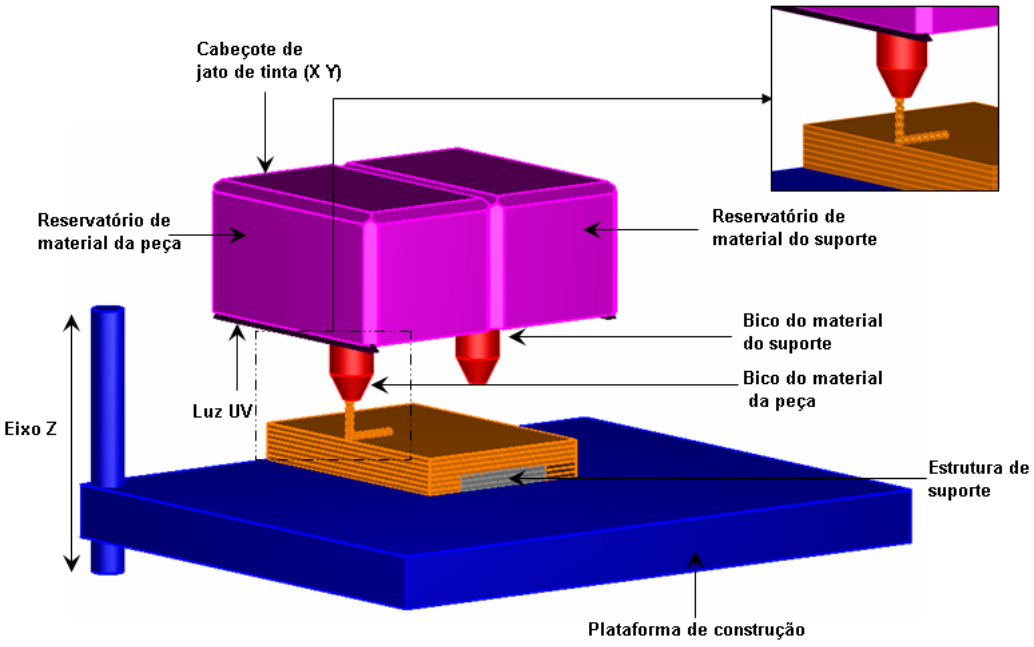


Figura 4.3 Princípio de funcionamento do processo "InVision"

Finalizado o processo de construção, o produto é submetido a uma etapa de pós-cura. Esta etapa é realizada em um forno que aquece o produto gradativamente. Os materiais dos suportes são retirados neste instante. O tempo de aquecimento do forno varia de acordo com a quantidade de material de suporte a ser retirada.

4.3.3.2 Materiais disponíveis

O material do suporte é diferente do material do produto. Para o produto, utiliza-se resina epoxy fotossensível com 30% de cera, já para o suporte o material utilizado possui propriedades semelhantes a da cera (VOLPATO et al, 2007).

4.3.3.3 Vantagens da impressão a jato de tinta "InVision"

Volpato et al (2007) identificam como vantagens da IJP:

- boa precisão, viabilizando sua aplicação em múltiplas situações;
- boa qualidade superficial;
- não utiliza laser.

O representante Robtec da 3D Systems no Brasil também destaca algumas vantagens:

- material fotopolimérico acrílico altamente durável;
- os modelos podem ser pintados;
- fácil utilização, não requerendo nenhum tipo de treinamento;
- pode ser utilizado com a energia elétrica de qualquer escritório;
- trabalha com redes do tipo LAN/WAN.

4.3.3.4 Desvantagens da impressão a jato de tinta "InVision"

Como deficiências do processo Volpato et al (2007) descrevem:

- necessidade de suportes em regiões desconectadas;
- tempo de pós-processamento para remoção dos suportes;
- poucos materiais disponíveis para a obtenção de protótipos, restringindo-se às resinas poliméricas.

4.4 Processos baseados em sólido

Para estes processos, o material utilizado para fabricação do produto se encontra no estado sólido, podendo ainda estar sob a forma de filamento, lâmina ou fundido para ser depositado. A diferença destes processos com relação aos processos baseados em líquido é pequena (VOLPATO et al, 2007).

4.4.1 Modelagem por fusão e deposição (FDM)

A tecnologia patenteada de modelagem por fusão e deposição (Fused Deposition Modeling – FDM™) da empresa Stratasys produz peças e protótipos com materiais termoplásticos de alta performance. A empresa representante desta tecnologia no Brasil é a Sysgraph.

A modelagem por fusão e deposição (FDM) pertenceu originalmente a uma classe de tecnologias de RP conhecidas como *concept modellers* (modeladores conceituais). Isto por que os modelos criados eram geralmente não-funcionais em termos de resistência, e o acabamento superficial era pobre quando comparado a outras tecnologias como a SL (UPCRAFT; FLETCHER, 2003).

Os modeladores conceituais entendem que este processo é rápido e limpo para criar peças onde qualquer erro grosseiro possa ser verificado, podendo ainda ser utilizado como ferramenta de comunicação entre o grupo de desenvolvimento do produto (UPCRAFT; FLETCHER, 2003).

4.4.1.1 Método da modelagem por fusão e deposição

Um filamento de material é extrudado por uma fina guia e depositado sobre uma plataforma. As guias se movem nos planos x e y até que o filamento seja depositado em uma fina camada compondo a secção transversal da peça.

A plataforma então se desloca no sentido vertical (em Z) a uma distância relativa para que a guia possa depositar a próxima fatia do material sobre a camada anterior. O filamento extrudado é aquecido até se tornar uma espécie de pasta, que dessa forma, adere à camada anterior.

A segunda guia é utilizada para extrudar materiais diferentes construindo suportes para a estrutura de baixo para cima quando necessário. Após a conclusão do processo o suporte estrutural precisa ser removido (quebrado) do produto (UPCRAFT; FLETCHER, 2003).

A tecnologia de FDM necessita da criação de estrutura para suporte. O suporte é utilizado para possibilitar a construção de regiões que não estejam conectadas ao corpo do produto durante a fase de construção. Desta forma, a máquina de FDM possui um bico extrusor exclusivo para criação de suportes.

Atualmente existem dois tipos de materiais para suportes, com sistemas de remoção diferentes após o termino do processo. No primeiro, o material utilizado na fabricação dos suportes é mais frágil que o da peça, facilitando sua retirada após o final do processo de forma manual. O segundo e mais recente utiliza um material que pode ser removido por imersão em solução líquida aquecida (VOLPATO et al, 2007).

A figura 4.4 mostra o princípio de funcionamento do processo de FDM.

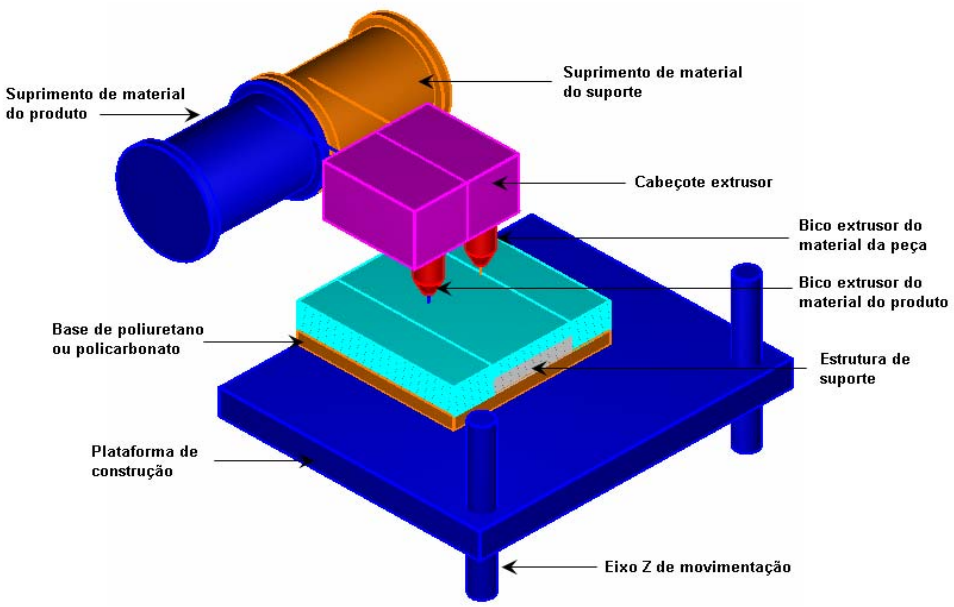


Figura 4.4 Princípio de funcionamento do processo FDM da Stratasys

De acordo com Kai et al (2003) apud Volpato et al (2007) as peças produzidas pelo processo de FDM possuem até 85% da resistência das peças obtidas pelo processo de injeção com o mesmo material.

4.4.1.2 Materiais disponíveis

Segundo o fabricante Sisgraph (2007) os seguintes materiais estão atualmente disponíveis para uso: ABS, Policarbonato (PC), PC-ABS, PC-ISO (para uso médico) e o Polifenilsulfona (PPSF).

4.4.1.3 Vantagens da modelagem por fusão e deposição

Upcraft e Fletcher (2003) descrevem como vantagem deste processo o fato de que as peças podem ser fabricadas em grande variedade de materiais e as máquinas podem ser facilmente preparadas para serem utilizadas em escritórios;

O fabricante apresenta como vantagens deste processo:

- as propriedades mecânicas dos materiais permitem à equipe de projetos produzir modelos que podem ser montados, testados e produzidos como peças;
- manufatura direto do escritório;
- requer infra-estrutura especialmente modificada, refrigeração ou ventilação.

- não necessita de pós-cura do material;
- não utiliza laser.

4.4.1.4 Desvantagens da modelagem por fusão e deposição

Upcraft e Fletcher (2003) descrevem que como em outros processos de RP são necessários suportes durante a fabricação do objeto. As peças possuem baixa resistência na direção vertical. O processo é lento em peças de grande massa e o acabamento superficial é pobre e pouco atrativo.

Volpato et al (2007) também identificam algumas desvantagens deste processo:

- a precisão do processo de FDM não é muito alta;
- necessidade de pós-processamento para remoção de suportes. Para o caso de remoção manual dos suportes, regiões pequenas e de difícil acesso podem dificultar ou até impedir a remoção completa do suporte. Para suportes solúveis este tipo de problema não existe;
- poucos materiais disponíveis para a obtenção de protótipos;
- velocidade de processo lenta e limitada.

4.4.4 Impressão a jato de tinta (IJP) "ThermoJet"

Também desenvolvido pela empresa 3D Systems, o processo "Thermojet" possui o mesmo princípio de funcionamento da IJP apresentada na subseção 4.3.3 fazendo parte do grupo *Multi-Jet Modeling*. No Brasil, esta tecnologia também é representada pela empresa Robtec.

4.4.4.1 Método da impressão a jato de tinta "ThermoJet"

O material é aquecido e depositado em forma de gotas, semelhante ao que ocorre no processo de uma impressora jato de tinta. Após o contato das gotas com a plataforma de construção ou com a camada depositada anteriormente o material se solidifica, formando então outra camada (VOLPATO et al, 2007).

O processo de construção do produto é acelerado com múltiplos jatos de tinta contidos no cabeçote de impressão.

De acordo com Kai et al (2003) apud Volpato et al (2007) um dos equipamentos disponíveis para este processo utiliza um cabeçote com 352 jatos alinhados em 200mm de largura. Desta forma, este sistema é capaz de depositar em uma única passada 200mm de largura de material. A figura 4.5 apresenta o princípio deste método.

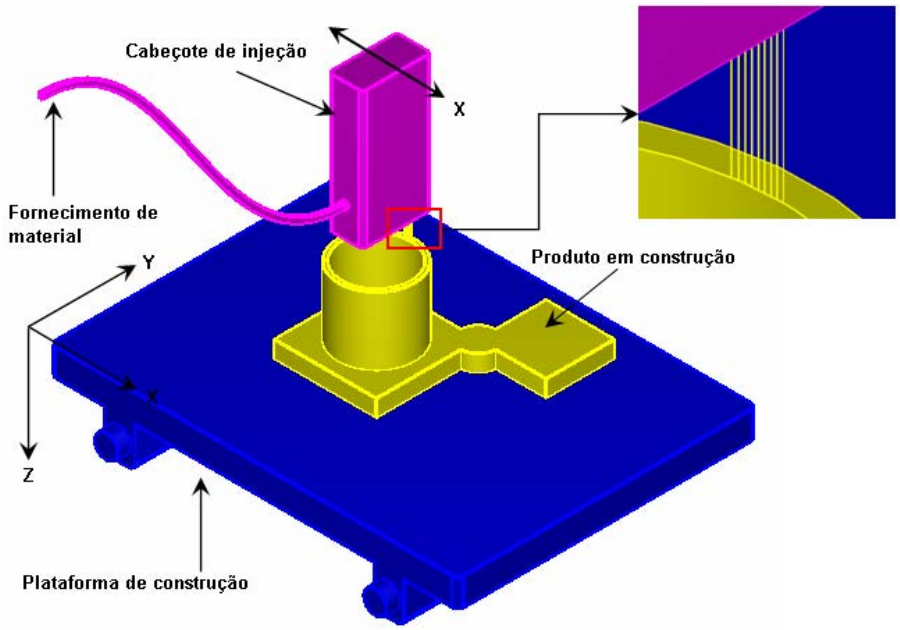


Figura 4.5 Princípio de funcionamento da IJP "ThermoJet"

4.4.4.2 Materiais utilizados

Inicialmente, a cera era o material utilizado por este processo. Porém, a empresa desenvolveu dois termopolímeros com melhores propriedades e que se adaptaram bem a este processo.

Para os suportes utiliza-se o mesmo tipo de material, portanto, uma quantidade mínima de volume para os suportes deve ser mantida.

Assim como nos demais processos de RP deste grupo faz-se necessário à fase de pós-processamento, que deve ser realizado com cuidado para não danificar o produto final (protótipo).

De acordo com Volpato et al (2007) a empresa 3D Systems comenta que, a remoção dos suportes torna-se mais fácil se primeiramente refrigerar o protótipo por algum tempo.

4.4.4.3 Vantagens da impressão a jato de tinta “ThermoJet”

Volpato et al (2007) apresentam como vantagens deste processo:

- fácil utilização, inclusive em ambientes de escritório;
- processo relativamente rápido;
- não requer uso de laser.

4.4.4.4 Desvantagens da impressão a jato de tinta “ThermoJet”

Da mesma forma, algumas deficiências também são identificadas por Volpato et al (2007):

- necessidade de suportes estruturais, além de serem fabricados com o mesmo material do produto;
- pós-processamento para remoção dos suportes;
- baixa quantidade de materiais disponíveis para obtenção de protótipos;
- fragilidade dos protótipos.

4.5 Processos baseados em pó

Nesta categoria de processos, o material de construção encontra-se na forma de pó. Devido ao fato de se trabalhar com o pó, uma grande variedade de materiais pode ser processada, assim, comparado às outras duas categorias de RP apresentadas nas seções 4.3 e 4.4 a gama de material disponível nesta categoria é bem mais ampla (VOLPATO et al, 2007).

4.5.1 Sinterização seletiva a laser (SLS)

A *Selective Laser Sintering* (SLS) – sinterização seletiva a laser (SLS) permite a construção de protótipos rápidos em uma variedade de materiais. Peças de geometria complexa podem ser produzidas utilizando-se materiais a base de pó (UPCRAFT; FLETCHER, 2003). No Brasil, esta tecnologia é representada pela empresa Robtec.

Segundo Beaman et al (1997) apud Volpato et al (2007) o primeiro equipamento de SLS foi comercializado em 1982. Em 2001, a empresa 3D Systems, Inc. comprou a empresa DTM e passou a deter os direitos desta tecnologia.

4.5.1.1 Método da sinterização seletiva a laser

O método de construção da SLS não difere conceitualmente dos demais processos de RP. O material de construção fica armazenado em reservatórios ao lado do recipiente de construção. O recipiente de construção também possui uma plataforma que se desloca no sentido vertical (em Z) de acordo com a espessura de camada desejada.

A construção física do produto se inicia com o material sendo espalhado e nivelado por um rolo na câmara de construção do equipamento. Nesta câmara, o material é aquecido a uma temperatura pouco abaixo do limite de fusão do material e mantida em atmosfera inerte. Com o uso do nitrogênio evita-se a oxidação e o risco de explosão das partículas mais finas (VOLPATO et al, 2007).

Um feixe laser se desloca pela superfície do material espalhado sobre o recipiente de construção, fornecendo energia para sinterizar as partículas do material de acordo com a geometria 2D da camada do produto em construção.

A plataforma de construção então se desloca novamente em Z expondo uma nova camada de material a ser sinterizado. A temperatura do novo material precisa atingir a temperatura de trabalho, assim, o feixe laser inicia novamente a varredura da superfície, sinterizando a nova camada.

A figura 4.6 mostra o princípio deste processo.

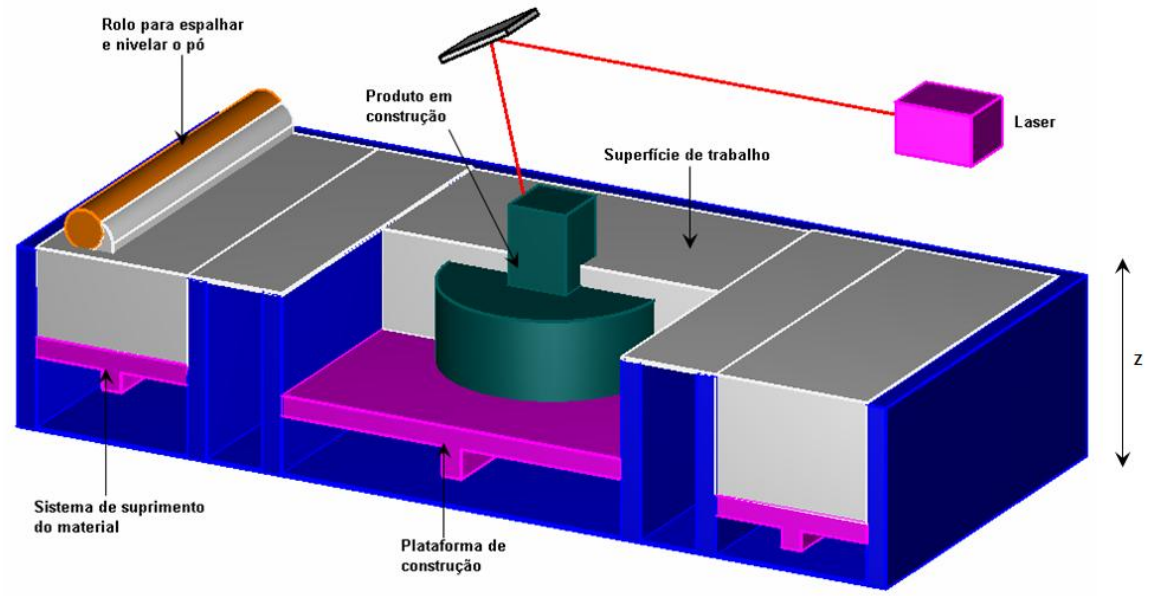


Figura 4.6 Princípio de funcionamento do processo SLS

“A velocidade de deslocamento do feixe laser sobre a superfície de trabalho, associada à potência do laser e ao diâmetro do feixe, definem a quantidade de energia que está sendo entregue às partículas do material para sinterizá-las” (VOLPATO et al, 2007).

Para a sinterização da camada de material, é necessário uma quantidade específica de energia do laser. Porém, num determinado instante, a camada processada pode não possuir material a ser sinterizado em uma determinada região, desta forma, o feixe laser acaba incidindo além da profundidade especificada no processo. Este evento causa um problema no dimensional do produto na direção Z conhecido como Bônus Z, que muito conhecido nos processos de SLS.

Segundo Volpato et al (2007), este crescimento pode ser minimizado através de uma metodologia que desloca os triângulos da região discretizada com face para baixo um determinado valor para cima.

4.5.1.2 Materiais disponíveis

A SLS pode processar uma grande quantidade de materiais, quando comparada com os demais processos de RP.

Sob o aspecto teórico, qualquer tipo material que possa ser transformado em pó pode ser empregado nesta tecnologia.

De acordo com Volpato et al (2007) os seguintes materiais estão disponíveis para esta tecnologia: elastômero, nylon, poliamida, poliamida com microesferas de vidro, cerâmica e metal com polímero para obtenção de peças e insertos metálicos.

Para o materiais metálicos, faz-se necessária a etapa de pós-processamento do material em forno à alta temperatura após a retirada do produto do equipamento de SLS e, dependendo da aplicação, operações de acabamento superficial são requeridas.

4.5.1.3 Vantagens da sinterização seletiva a laser

Volpato et al (2007) apresentam como vantagens desde processo:

- grande quantidade de materiais que podem ser utilizados, sendo estes não tóxicos;
- apenas um único equipamento pode processar vários tipos de materiais (polímeros, cerâmicas e metais);
- pode fabricar protótipos para visualização ou fabricar peças para testes funcionais, podendo se aproximar bastante das propriedades do produto final;

- de acordo com o tipo de material, o processo exige pouco pós-processamento, não havendo necessidade de retirada dos suportes;
- possibilidade de empilhar vários produtos para fabricação;
- o material sinterizado não necessita de pós-cura, com exceção dos materiais metálicos com polímeros, em que o produto é levado a um forno de alta temperatura para siterização final do metal.

4.5.1.4 Desvantagens da sinterização seletiva a laser

Algumas desvantagens também são apresentadas por Volpato et al (2007):

- segundo Kai et al (2003) apud Volpato et al (2007) este processo tende a ter um acabamento superficial não muito bom, devido ao tamanho de partículas utilizadas;
- alto custo do equipamento;
- consumo elevado de energia para sinterizar as partículas do material utilizado.

4.5.2 Sinterização a laser sistema “EOSINT”

O princípio desta tecnologia é praticamente o mesmo da SLS da empresa 3D Systems. As diferenças básicas estão no tipo de equipamento fornecido pela empresa, que busca adequar os equipamentos ao tipo de material utilizado, por exemplo: o EOSINT M é um equipamento para trabalhar exclusivamente com metal, o EOSINT P é um equipamento para trabalhar exclusivamente com polímero, e o EOSINT S para trabalhar com areia, utilizando fonte de nitrogênio própria, não havendo necessidade de suprimento externo. No Brasil esta tecnologia esta representada pela empresa Advanced Manufacturing Systems, ou simplesmente AMS Brasil.

4.5.2.1 Método da sinterização a laser “EOSINT”

Similar ao processo de SLS da empresa 3D Systems, o processo de sinterização da “EOSINT” se inicia com o material sendo espalhado por uma lâmina e uma espécie de canalete em uma câmara de trabalho.

Quando o canalete chega à extremidade lateral do equipamento, uma nova quantidade de material é suprida ao sistema.

Da mesma forma que na SLS da 3D Systems, a câmara de trabalho se encontra em atmosfera inerte com gás nitrogênio gerado por uma fonte própria do equipamento. Desta forma, não é necessário suprimento externo de gás.

Um feixe laser CO_2 descreve a geometria do produto em construção através da camada de material espalhado na câmara. O contato do feixe laser com o material aquece as partículas do mesmo até o ponto de fusão, fazendo com que a camada superior e a inferior entrem em adjunção neste processo.

Comparável aos outros processos de RP, após a sinterização da camada, a plataforma de construção desce na direção Z conforme mostrado na figura 4.7 o equivalente a outra espessura de camada, o pó é então espalhado e o processo se repete até a última camada do produto, finalizando o processo.

Ao final do processo o pó não utilizado na construção pode ser removido com o auxílio de uma escova, ar comprimido ou algum meio de aspiração do material.

O material não sinterizado funciona como suporte natural do produto, tornando desnecessária a preparação de suporte durante o processamento do arquivo em CAD. A figura 4.7 ilustra o princípio desta tecnologia.

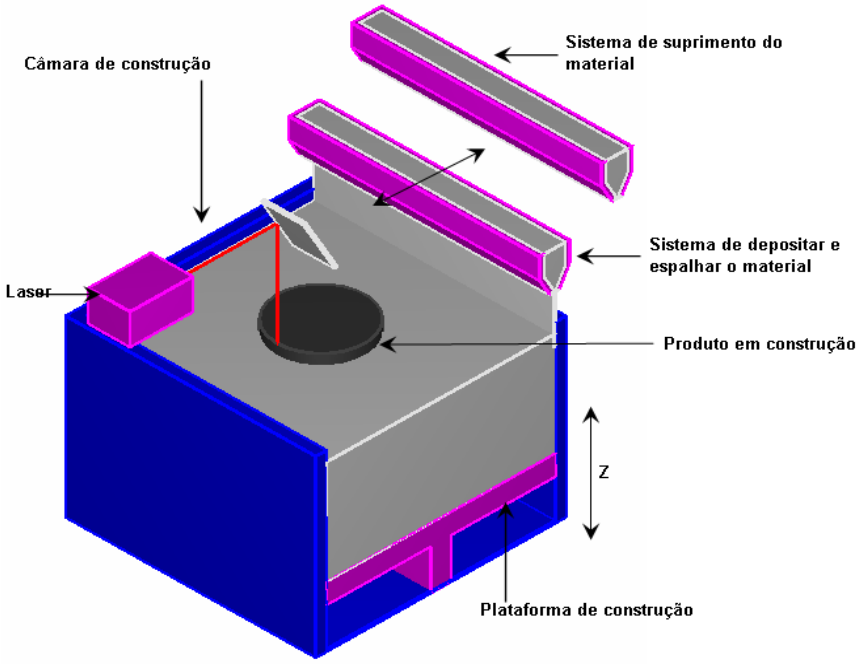


Figura 4.7 Princípio de funcionamento do processo “EOSINT”

4.5.2.2 Materiais disponíveis

De acordo com o fabricante, existe uma grande variedade de materiais atualmente disponíveis para uso nesta tecnologia. Trata-se de materiais a base de poliestireno ou poliamida. Estes materiais podem ser combinados com alumínio, vidro ou fibra de carbono. Alguns destes materiais são: PA 2200, PA 2210, PrimePart™; CarbonMide® entre outros.

4.5.2.3 Vantagens da sinterização a laser "EOSINT"

Volpato et al (2007) identificam como vantagens deste processo:

- a grande diversidade de materiais que podem ser utilizados na obtenção de protótipos;
- pouca necessidade de pós-processamento;
- pós-cura desnecessária do produto;
- suportes naturais no decorrer do processo, não havendo a necessidade de se criar os mesmos através do sistema;
- possibilidade de empilhar vários produtos para fabricação;
- protótipos válidos tanto para aplicações de visualização quanto para testes funcionais, podendo se aproximar bastante das propriedades do produto final;
- possibilidade de construção de peças grandes, com geometrias entre 700x380x580mm devido aos equipamentos disponíveis para este volume de trabalho.

4.5.2.4 Desvantagens da sinterização a laser "EOSINT"

Volpato et al (2007) também identificam como desvantagens deste processo:

- alto custo do equipamento;
- equipamentos dedicados para cada tipo de material.

4.5.4 Impressão tridimensional (3DP)

Ao contrário das outras tecnologias deste grupo, a 3DP não utiliza laser para processar o material em forma de pó. De acordo com Volpato et al (2007) o material é agregado por um aglutinante depositado por impressão do tipo jato de tinta. A empresa representante desta tecnologia no Brasil é a Seacam.

4.5.4.1 Método da impressão tridimensional

O material é espalhado e nivelado por um rolo que percorre a superfície da câmara de trabalho. O aglutinante incide sobre o material através do cabeçote de impressão de acordo com a geometria da camada que está sendo processada.

O material não processado ao redor do produto em construção serve de suporte natural, não havendo necessidade do sistema de CAD criar suportes durante a separação do modelo 3D em camadas.

De acordo com Volpato et al (2007) várias peças podem ser fabricadas e empilhadas em uma operação.

As peças concebidas por este processo necessitam de pós-processamento para aumentar a resistência ou melhorar o aspecto da superfície. O pós-processamento pode variar de acordo com o material utilizado.

4.5.4.2 Materiais disponíveis

Assim como nos demais processo de RP a base de pó, teoricamente, qualquer material que possa ser processado e transformado em pó pode ser utilizado neste processo.

Os materiais comumente utilizados são: cerâmica, metal, polímero, gesso e material a base de amido. Para cada tipo de material, um aglutinante específico deve ser desenvolvido.

4.5.4.3 Vantagens da impressão tridimensional

Volpato et al (2007) apresentam como principais vantagens deste processo:

- não utilização do laser;
- alta velocidade – Segundo Kai et al (2003) apud Volpato et al (2007), esta é a tecnologia mais rápida do mercado até o momento;
- não necessita de suportes, o material não processado ao redor da peça serve de suporte natural durante a construção;
- não existe desperdício de material. O pó não processado pode ser novamente reutilizado.

4.5.4.4 Desvantagens da impressão tridimensional

Volpato et al (2007) apresentam como desvantagens deste processo:

- funcionalidade limitada das peças;
- poucos materiais disponíveis;
- necessita fase de pós-processamento para limpeza e infiltração com resina para melhorar a resistência das peças;

4.6 Seleção dos processos de prototipagem rápida estudados

A partir da pesquisa apresentada neste capítulo e considerando os atributos característicos das peças protótipo apresentados na subseção 3.7 é possível realizar uma seleção dos processos de RP estudados.

A tabela 4.1 apresenta um sumário dos processos de RP e suas principais características.

Tabela 4.1 Sumário das tecnologias de RP

Processo	Baseados em Líquido			Baseados em Sólido			Baseados em Pó	
Características	**SL**	**IJP PolyJet**	**IJP InVision**	**FDM**	**IJP ThermoJet**	**SLS**	**EOSINT**	**3DP**
Empresa	Robtec	Kehl / Artis	Robtec	Sisgraph	Robtec	Robtec	AMS	Seacam
Custo do protótipo	Alto	Médio	Baixo	Médio-Alto	Médio	Alto	Alto	Baixo
Precisão	Alta	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Baixa
Velocidade de construção	Média	Média	Alta	Baixa	Média-Alta	Média	Média	Alta
Resistência mecânica	Média	Média	Baixa	Média	Baixa	Alta	Alta	Baixa
Tamanho máximo de peças	508 x 508 x 584mm	336 x 326 x 200mm	298 x 185 x 203mm	600 x 500 x 600mm	250 x 204 x 204mm	381 x 330 x 457mm	700 x 380 x 580mm	508 x 609 x 406mm

(VOLPATO et al, 2007 – adaptado pelo autor)

Os atributos apresentados na subseção 3.7 foram: precisão dimensional, resistência mecânica e dimensão das peças protótipos.

Com base nestes requisitos os processos de RP que podem ser utilizados na fabricação das peças protótipo são: estereolitografia (SL); modelagem por fusão e deposição (FDM) e sinterização seletiva a laser da EOS (EOSINT).

Embora as dimensões finais obtidas em todos os processos apresentados possam ser maximizadas através de etapas de pós-processamento, como a construção do modelo em partes e a formação final deste através da colagem das partes, isto exigiria maior tempo de fabricação, custos envolvidos com o pós-processamento e principalmente perda dimensional em função do tamanho das peças protótipo.

4.7 Análises e conclusões

Neste capítulo foram estudados os processos de RP existentes no mercado doméstico até o presente momento, bem como os mais utilizados atualmente.

Embora vários processos de RP tenham surgido ao longo das últimas duas décadas conforme estudo apresentado por Upcraft e Fletcher (2003), alguns processos ainda se destacam e se consolidam no mercado ao longo destes anos.

A seleção dos processos de RP possibilitou a verificação de quais processos atendem os atributos necessários para fabricação das peças utilizadas no ensaio estático das embalagens de acordo com a subseção 3.7.

As restrições de tamanho das peças identificadas nestes processos podem ser resolvidas com a fabricação do modelo requerido em partes, onde se obtém a forma e tamanho final após uma etapa de pós-processamento. Nesta etapa as partes construídas separadamente são agrupadas através de um processo de colagem, exigindo maior tempo de fabricação e custos envolvidos com o pós-processamento.

Outro aspecto importante que deve ser observado na aplicação das tecnologias de RP na fabricação das peças protótipo é que as etapas de pós-processamento (colagem) afetam o dimensional das peças. Isto pode ser monitorado durante a etapa de pós-processamento, no entanto, acarretaria em maior tempo de fabricação, bem como maiores custos.

Desta forma, a aferição das peças produzidas por estes processos se faz importante. Os métodos de medição existentes como a medição tridimensional são capazes de coletar informações dimensionais do produto físico e compará-las as informações de projeto. Nestes métodos de medição, a peça é posicionada em uma plataforma padrão e uma máquina composta por um braço mecânico que se desloca nas direções x, y e z coleta as medidas do produto físico. Ao final se tem um relatório dimensional validando ou reprovando o produto aferido.

No capítulo 5 os processos de ferramental rápido (RT) serão apresentados. Os processos de RT capazes de atender os atributos de decisão serão selecionados de forma

análoga ao capítulo 4. Os estudos dos capítulos 4 e 5 irão fornecer o suporte necessário para o estudo de caso apresentado no capítulo 6.

5 FERRAMENTAL RÁPIDO

De acordo com Chua (1999) apud Pereira (2007) o termo *Rapid Tooling* (RT) - ferramental rápido (RT) pode ser definido como uma tecnologia que utiliza técnicas de prototipagem rápida para fabricar, de forma direta ou indireta, matrizes e moldes.

Segundo Rosochowiski e Matuszak (2000), as definições de classificação dos processos de RT não são claras, e em alguns casos, sobrepõem-se entre outros domínios pertencentes a outras tecnologias. Apesar disto, Rosochowiski e Matuszak (2000) sugerem a classificação das técnicas de RT com base em aspectos práticos, ao invés de firmar-se em definições rígidas. A figura 5.1 mostra a classificação dos processos de RT de acordo com a sugestão de Rosochowiski e Matuszak (2000).

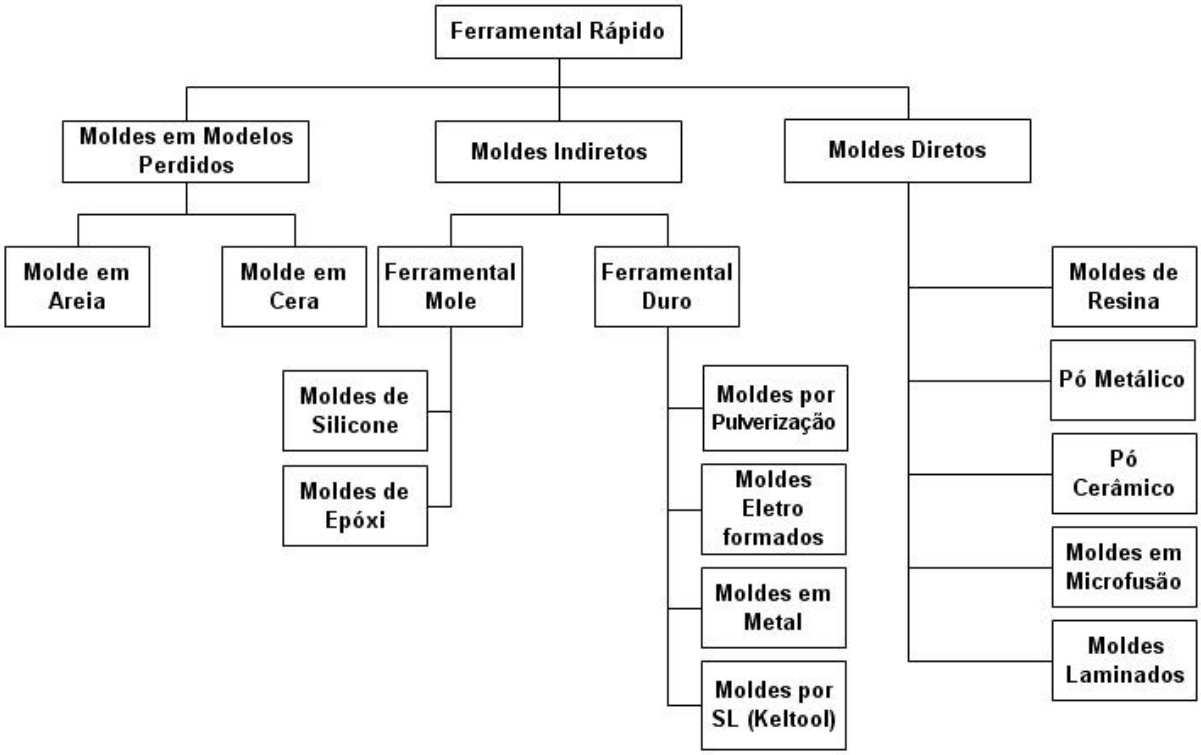


Figura 5.1 Classificação dos processos de RT (ROSOCHOWISKI; MATUSZAK, 2000 – adaptado pelo autor)

De acordo com Pereira (2007), diversas tecnologias de fabricação rápida de ferramentas, especialmente para construção de moldes para injeção, foram desenvolvidas desde o surgimento das técnicas de RP em 1988. Assim, os processos de RT foram classificados basicamente em dois grupos:

- fabricação direta, onde o molde ou ferramenta é construído diretamente utilizando técnicas de prototipagem rápida como a estereolitografia (SL), sinterização seletiva a laser (SLS), modelagem por fusão e deposição (FDM), entre outras;
- fabricação indireta, onde um modelo do produto que se deseja fabricar é construído, utilizando-se técnicas de fabricação rápida, para ser utilizado posteriormente na fabricação do molde (PEREIRA, 2007).

Da mesma forma que Pereira (2007), Martins (2005) também classifica os processos de RT em diretos e indiretos. Em complemento a isto, Martins (2005) agrupa as tecnologias existentes a elas, o que torna possível uma visão global da distribuição destas tecnologias entre as duas classes. A figura 5.2 ilustra esta classificação.

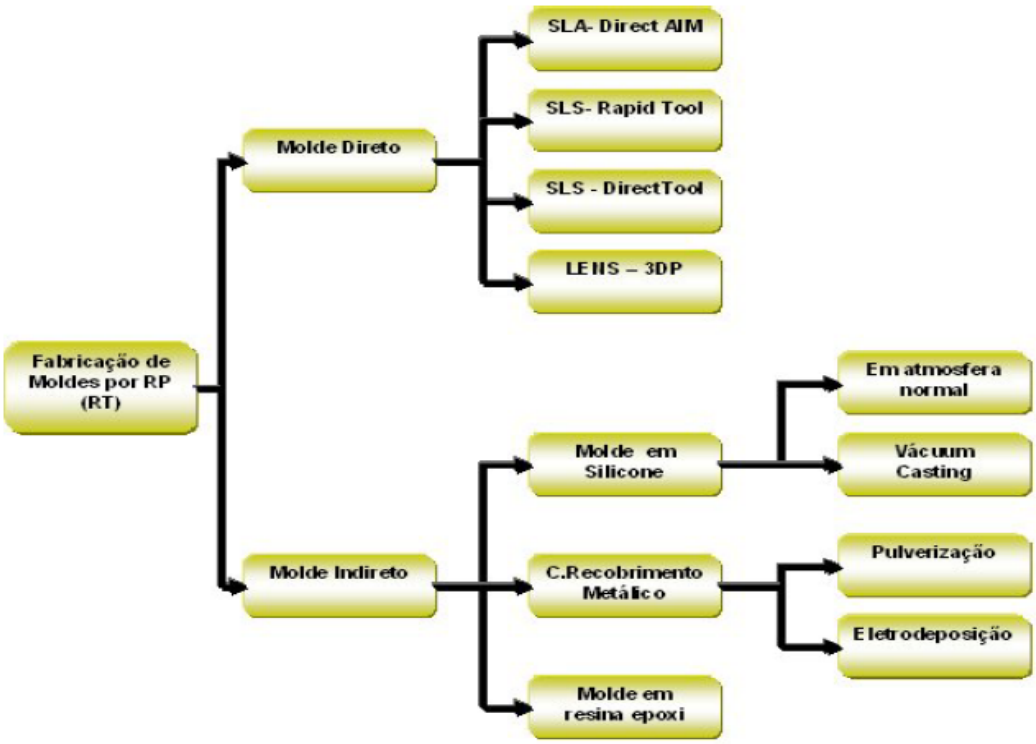


Figura 5.2 Classificação dos processos de RT (MARTINS, 2005)

Segundo Volpato et al (2007), as principais tecnologias de RT com representantes no Brasil são: Direct AIM, RapidTool, DirectTool, Direct Cast, Moldes de Epoxy, RTV, Vacuum Casting e Keltool.

Macarrão Júnior e Kaminski (2006) também apresentam a tecnologia de RT denominada Vacuum Bagging, utilizada na fabricação de moldes e ferramentas para fabricação de peças automotivas.

É importante observar que para os processos indiretos, os mesmos utilizam como base para a construção do molde diferentes materiais como metais leves, resinas epoxídicas e borrachas de silicone (ROSATO, et al, 1995 apud BATERA et al, 2006). Outros materiais também podem ser utilizados como por exemplo compósitos de epoxy e pó de alumínio (SERAFIN et al, 2006).

Com base nas informações apresentadas, os processo de fabrico de moldes comumente utilizados e disponíveis no mercado doméstico podem ser organizados de acordo com a figura 5.3.

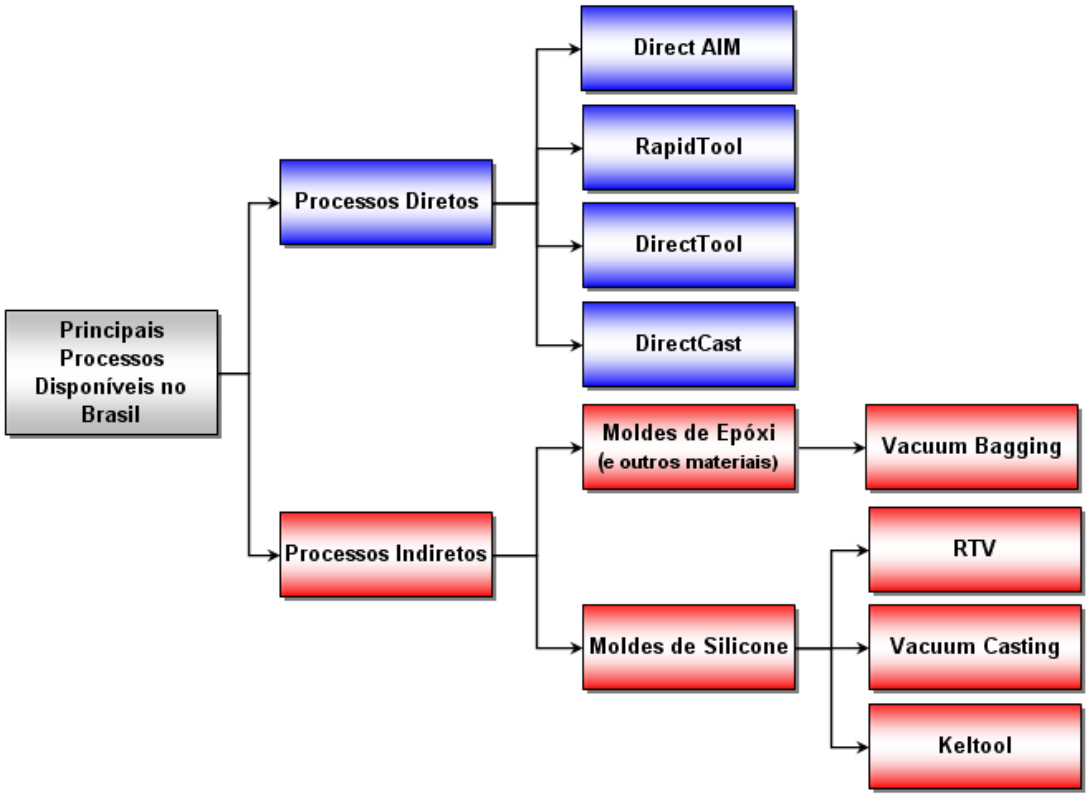


Figura 5.3 Classificação dos principais processos de RT disponíveis no mercado doméstico

Da mesma forma que nos processos de RP, adotar-se-á neste capítulo, as principais tecnologias diretas e indiretas de RT disponíveis no mercado doméstico, conforme já justificado no capítulo 4 deste trabalho.

5.1 Processos diretos

Conforme exposto no início deste capítulo, os processos de RT apresentados a seguir têm como característica principal a sua obtenção de forma direta a partir de um dos processos de RP.

5.1.1 Direct AIM

[...] “este processo permite fabricar insertos que contém a cavidade de moldes de injeção pelo processo de SL [...]” (VOLPATO et al, 2007). A sigla AIM é procedente do idioma inglês, onde a letra A é uma abreviação do termo ACES, que significa *Accurate Clear Epoxy Solid*, e as demais letras significam *Inject Molding* para se referir ao estilo de construção utilizado pelo sistema de prototipagem rápida na construção do inserto[17].

5.1.1.1 Método da Direct AIM

Conforme mostrado na subseção 4.3.1.1 deste trabalho o princípio da SL baseia-se na transformação de uma resina composta por monômeros fotossensíveis que se transformam em cadeias poliméricas e se solidificam ao ficarem expostos a um feixe laser.

De acordo com Vasconcelos et al (2002) a ferramenta pode ser construída de forma maciça ou em casca através da estereolitografia, com ou sem enchimento de material para reforço. Volpato et al (2007) descrevem sobre as três formas básicas de construção dos moldes. A primeira consiste em fabricar os insertos do molde de forma maciça. A segunda é a sua fabricação na forma de uma caixa ou casca, sendo esta última com espessura variando entre 1,5 e 3mm. Esta forma requer um preenchimento posterior da parte interna da caixa a fim de proporcionar maior resistência mecânica. A terceira forma consiste em fabricar o molde em forma de uma caixa com pequenos orifícios que permitem o contato do material de preenchimento com o polímero que é injetado durante a moldagem, acelerando o processo de resfriamento da peça.

5.1.1.2 Vantagens da Direct AIM

Vasconcelos et al (2002) apresentam as seguintes vantagens da Direct AIM:

- rapidez elevada na fabricação de moldes e ferramentas;
- custo médio de fabricação.

Hanumaiah, Ravi e Mukherjee (2006) apresentam outras vantagens deste processo:

- boa precisão dimensional;

[17] De acordo com Ribeiro Junior (2003) apud Lencina (2004), inserto é a parte do molde de injeção que contém a região moldante ou cavidade, e que é fabricada separadamente e ulteriormente montada nas placas do molde.

alta velocidade de fabricação;

5.1.1.3 Desvantagens da Direct AIM

Da mesma forma, Vasconcelos et al (2002) apresentam as seguintes desvantagens:

- necessidade de insertos;
- baixa durabilidade do molde ou da ferramenta;
- necessidade de se trabalhar com geometrias simples.

Volpato et al (2007) também apresentam algumas desvantagens deste processo:

- vida útil reduzida, com a possibilidade de injetar entre 50 e 500 componentes em polipropileno (PP);

Outra limitação identificada por Hanumaiah, Ravi e Mukherjee (2006) é a baixa resistência mecânica das peças produzidas por este processo.

5.1.2 RapidTool

De acordo com Radstok (1999) apud Lencina (2004) o processo RapidTool^{TM} é de propriedade da empresa norte-americana 3DSystems^{R}, que por sua vez é representada pela empresa Robtec no Brasil.

5.1.2.1 Método da Rapid Tool

Este método possibilita a fabricação de insertos metálicos através da sinterização a laser de material na forma de pó, composto de aço inoxidável recoberto por um aglutinante a base de polímeros, a partir de um desenho gerado em CAD. Após a fabricação do inserto o aglutinante é removido por queima em forno apropriado. Uma vez removido, infiltra-se cobre no lugar deixado pelo aglutinante. Este processo melhora as propriedades térmicas e mecânicas da ferramenta (JETLEY; LOW, 2006; RADSTOK, 1999 apud LENCINA, 2004; VASCONCELOS et al, 2002).

5.1.2.2 Vantagens da RapidTool

Volpato et al (2007) e Vasconcelos et al (2002) apresentam as seguintes vantagens da RapidTool:

- moldes por vazamento;
- utilização de temperaturas e pressões de injeção típicas;
- durabilidade elevada.

5.1.2.3 Desvantagens da RapidTool

Volpato et al (2007) e Radstok (1999) apud Lencina (2004) apresentam as seguintes desvantagens para este processo:

- necessidade de etapas de pós-processamento;
- dificuldade de manter o dimensional do ferramental quando este for submetido às etapas de queima para infiltração e retirada do aglutinante.
- necessidade de usinagem de acabamento em alguns casos;
- limitações quanto ao uso de *conformal cooling channels*[18], devido à difícil remoção do pó não sinterizado em canais com maior complexidade.

Vasconcelos et al (2002) também identificam as seguintes limitações para este processo:

- fabricação de peças pequenas;
- processo lento;
- rugosidade elevada;
- necessidade de polimento.

[18] De acordo com Sachs, Cima e Cornie (1990) e Dalgarno, Stewart e Childs (2000) apud Volpato et al (2007), o termo *conformal cooling channels* se refere à incorporação de canais de refrigeração no insertos em conformidade com a geometria da cavidade. Isto permite o projeto de um sistema de refrigeração mais eficiente e balanceado.

5.1.3 DirectTool (DMLS)

A Direct Metal Laser Sintering, conhecida comercialmente por DirectTool, é uma tecnologia da empresa EOS-Gmbh da Alemanha, representada pela empresa Advanced Manufacturing Systems do Brasil (AMS).

5.1.3.1 Método da DirectTool

Similar ao processo da RapidTool, este processo utiliza uma liga conhecida comercialmente por DirectMetal composta por bronze, níquel e fosfato de cobre. Diferentemente do processo RapidTool, a DirectTool não requer etapa de pós-processamento para retirada de material aglutinante, o que reduz o seu tempo de fabricação (VASCONCELOS et al, 2002; LENCINA, 2004; VOLPATO et al, 2007).

5.1.3.2 Vantagens da DirectTool

Vasconcelos et al (2002) apresentam como vantagens deste processo:

- durabilidade elevada;
- menor tempo de fabricação quando comparado ao processo de RapidTool;
- versões para fabricação de ferramentas em areia para fundição, metal e termoplásticos.

Lencina (2004) identifica como vantagem da DirectTool a possibilidade de obtenção de peças com boa precisão dimensional, com tolerâncias inferiores a 0,05mm.

Volpato et al (2007) também apresentam com vantagem da DirectTool a não necessidade de retirada de material aglutinante, o que elimina esta etapa de pós-processsamento.

Ainda de acordo com Hanumaiah, Ravi e Mukherjee (2006) as peças produzidas por este processo apresentam boa resistência mecânica.

5.1.3.3 Desvantagens da DirectTool

De forma análoga ao processo RapidTool, Vasconcelos et al (2002) e Volpato et al (2007) apresentam as seguintes limitações para este processo:

- fabricação de peças pequenas;
- rugosidade elevada;
- necessidade de polimento;
- necessidade de usinagem em alguns casos;
- no caso do material do molde ser liga de bronze, sua a vida fica limitada somente as baixas pressões de moldagem;
- limitações quanto ao uso de *conformal cooling channels*.

Lencina (2004) também identifica como uma desvantagem deste processo o seu alto custo quando comparado ao processo RapidTool.

5.1.4 DirectCast

Trata-se de um equipamento específico da empresa EOS GmbH da Alemanha, com a AMS representante desta tecnologia no Brasil, que utiliza a sinterização seletiva a laser de partículas de uma areia especial (VOLPATO et al, 2007).

5.1.4.1 Método da DirectCast

De acordo com o fabricante EOS-GmbH (2007) a DirectCast pode ser descrita como a sinterização direta a laser de grãos de areia e moldes. O sistema constrói produtos altamente complexos diretamente a partir dos grãos de areia.

O componente a ser produzido no molde é primeiramente projeto no computador. Após esta etapa, o componente é invertido e digitalizado para se criar o molde de injeção. O molde é então produzido a partir do processo de sinterização seletiva a laser (SLS). O processo de fabricação do molde pode ser concluído em algumas horas, dependendo do tamanho e da complexidade da peça a ser reproduzida pelo molde. Este processo permite a produção de peças em alumínio, ferro, aço, magnésio e outros tipos de materiais (MANUFACTURING CENTER, 2007).

5.1.4.2 Vantagens da DirectCast

De acordo com o fabricante EOS-GmbH (2007) a DirectCast apresenta as seguintes vantagens:

- excelentes resultados com a utilização de alumínio e magnésio como materiais de construção;
- aplicações em materiais como ferro e aço;
- os grãos sinterizados não requerem o modelamento de canais de ar em ângulo;

5.1.4.3 Desvantagens da DirectCast

De acordo com o autor a DirectCast apresenta as seguintes limitações ou desvantagens:

- necessita de equipamento específico para o processo;
- produção de pequenos lotes;
- produção de peças relativamente pequenas (720 mm x 380 mm x 380 mm);
- limitada a produção de peças em materiais metálicos.

5.2 Processos indiretos

Conforme descrito anteriormente, o processos indiretos utilizam a tecnologia de prototipagem rápida para a construção de uma peça protótipo, que é utilizada como modelo para a fabricação do molde ou ferramenta, através de outros processos secundários de fabricação (MYERS; NORTON, 1998 apud LENCINA, 2004).

Estes processos existem muito antes do surgimento da RP, porém, em função da obtenção rápida de modelos, estes processos passaram a ser utilizados com bastante freqüência para fabricação de moldes e modelos (MARTINS, 2005; VOLPATO et al, 2007).

5.2.1 Vulcanização à temperatura ambiente (RTV)

De acordo com Vasconcelos et al (2002), a fabricação de moldes em borracha vulcanizada de silicone, também conhecido como vulcanização à temperatura ambiente (*Room Temperature Vulcanizing* - RTV) constitui em um dos processos mais utilizados em

RT. Este processo, também classificado como *soft tooling*[19], permite a fabricação de peças em plástico em quantidades que podem variar entre 10 a 50 unidades.

5.2.1.1 Método da vulcanização à temperatura ambiente

O primeiro passo deste processo é preparação do modelo da peça a ser moldada. Uma vez que o modelo está pronto, o próximo passo é colocar o modelo em um recipiente de dimensões pouco maiores a do modelo, para que este possa ser recoberto com silicone. Com o modelo devidamente posicionado no recipiente, o silicone é depositado sobre o modelo, de forma a cobri-lo até o ponto em que se deseja obter a sua reprodução. O recipiente contendo o modelo e o silicone é então submetido a um processo de desgaseificação para eliminar ao máximo as bolhas remanescentes no interior do silicone. Após a cura do silicone, ou seja, a sua vulcanização, o molde está pronto para ser cortado para a extração do modelo contido em seu interior. Após a sua abertura, o molde está pronto para ser utilizado.

5.2.1.2 Vantagens da vulcanização à temperatura ambiente

Macarrão Junior, Braga e Kaminski (2005) identificam os seguintes tópicos como vantagens deste processo:

- baixo custo de fabricação;
- facilidade de obtenção do molde;
- precisão do processo, incluindo peças de geometria complexas.

Groth e Grimm (2002) apud Macarrão Junior, Braga e Kaminski (2005) também identificam a RTV como meio de solução para a produção de pequenos lotes de peças plásticas com rapidez e custos acessíveis.

5.2.1.3 Desvantagens da vulcanização à temperatura ambiente

Como desvantagens ou limitações deste processo são apresentados os seguintes tópicos:

---

[19] *Soft tooling* é uma expressão do idioma inglês que neste trabalho pode ser compreendida como ferramental mole. Isto pelo fato de que este tipo de ferramenta permite uma reprodução em baixa escala, ou seja, em torno de 10 a 50 peças.

- os protótipos obtidos não apresentam as mesmas propriedades da peça final (VOLPATO et al, 2007);
- o molde tem uma vida útil relativamente pequena, possibilitando a produção de um lote pequeno de peças, entre 10 a 50 peças (VASCONCELOS et al, 2002).

Outra limitação identificada por Macarrão Junior, Braga e Kaminski (2005) é que para a produção de peças de grandes dimensões, reforços estruturais são requeridos para impedir a flexão das peças.

5.2.2 Moldes de epoxy

Este processo permite a fabricação de ferramentas em um curto espaço de tempo, a partir de um modelo gerado em uma das tecnologias de RP (PEREIRA, 2007). Este processo é também conhecido como ferramental de compósito à base de epoxy, semelhante ao processo de moldes de silicone (RTV) (VOLPATO et al, 2007).

5.2.2.1 Método de obtenção de moldes de epoxy

Similar ao processo de obtenção de moldes em silicone (RTV), os moldes em epoxy são fabricados a partir de um modelo gerado em um processo de RP. De posse do modelo finalizado, o mesmo é colocado em um recipiente para ser recoberto com a resina epoxy posteriormente. As superfícies do modelo que irão entrar em contato com a resina são então recobertas com um desmoldante[20] para facilitar a remoção do modelo. Após este processo, a resina epoxy é homogeneizada e submetida a um ambiente a vácuo antes de ser misturada com um agente catalisador (PEREIRA, 2007). Depois da preparação da mistura, o modelo é então recoberto com uma primeira camada, que pode ser aplicada com um pincel, prevenindo assim a formação de bolhas na superfície do molde. Nesta etapa pode-se definir a linha de corte do molde, que é feita normalmente com a utilização de um material em plasticina (PHAN; DIMOV; LACAN, 1998 apud VOLPATO et al, 2007). Com a finalização deste processo, o modelo pode então ser recoberto com a resina epoxy que é derramada no recipiente de forma lenta até que todo o modelo esteja submerso (PEREIRA, 2007). Com o passar do tempo necessário para a cura da resina epoxy, o processo de desmontagem do

[20] De acordo com Ferreira (2004) a palavra desmoldante é um adjetivo de dois gêneros relacionado à tecnologia química e é definida como uma substância utilizada para facilitar a desmoldagem de um objeto ou peça.

molde se inicia. Etapas de pós-cura podem ser realizadas, proporcionando um maior desempenho do molde (VILLAMIZAR, 2005 apud PEREIRA, 2007).

5.2.2.2 Vantagens dos moldes de epoxy

Peters (1998) apud Pereira (2007) identifica as seguintes vantagens deste processo:

- excelente adesão a uma grande variedade de materiais devido a sua natureza polar;
- baixa contração de cura. Isto permite uma boa precisão dimensional das peças;
- alta resistência química em ambientes agressivos.
- propriedades para resinas epoxy com cargas metálicas: alta dureza, baixa contração durante o processo de cura, alta temperatura de transição e boa resistência química.

Gomide (2000) apud Lencina (2004) também identifica como vantagens deste processo:

- possibilidade de obtenção de peças de grandes dimensões;
- baixo custo para materiais termoplásticos.

5.2.2.3 Desvantagens dos moldes de epoxy

Como uma desvantagem ou limitação deste processo Volpato et al (2007) identificam:

- por se tratar de uma reação exotérmica[21], nem sempre é possível modelar a resina diretamente sobre o modelo de forma adequada sem que este seja danificado.

Vasconcelos et al (2006) apud Ma et al (2007) também identificam a seguinte limitação ou desvantagem deste processo:

- no caso de resinas epoxy com carga de alumínio, estas apresentam baixa dureza e baixa resistência à compressão.

Ao contrário da afirmação de Peters (1998) apud Pereira (2007), Gomide (2000) apud Lencina (2004) identifica como um ponto fraco deste processo a precisão dimensional e a possibilidade de se obter peças complexas por este processo.

[21] De acordo com o Ferreira (2004) a palavra exotérmica é um adjetivo relacionado a uma reação química que ocorre em um sistema em que há liberação de calor para o meio externo.

5.2.3 Vacuum Casting

De acordo com a empresa Robtec (2007) a Vacuum Casting é o sistema mais vendido no mundo. Este sistema tem a finalidade de complementar os demais sistemas de RP na produção de pré-séries, onde se requer qualidade dimensional e acabamento superficial. O custo e o tempo são inferiores quando comparados aos processos convencionais de produção de ferramentas. Todo o processo é gerado a vácuo, o que possibilita precisão e ausência de problemas no interior da estrutura e na superfície do molde.

5.2.3.1 Método da Vacuum Casting

O processo da Vacuum Casting se inicia com a construção de um modelo em estereolitografia (SLA) que será utilizado posteriormente como padrão para construção do molde. Após a sua construção, o modelo padrão é fixado em uma caixa, que é preenchida com silicone, de forma que todo o modelo fique submergido. Com a fabricação do molde concluída, inicia-se o processo de injeção das peças, de acordo com as especificações de projeto. Após a cura do material, as peças injetadas são extraídas do molde concluindo o processo (ROBTEC, 2007).

5.2.3.2 Vantagens da Vacuum Casting

De acordo com o fabricante Robtec (2007) a Vacuum Casting apresenta as seguintes vantagens:

- redução de custos no desenvolvimento de produtos;
- boa resistência mecânica;
- produção de peças de tamanho médio;
- melhor qualidade e acabamento do protótipo;
- elimina longo tempo de entrega.

Também de acordo com Minev (2002) apud Rooks (2002), a Vacuum Casting é a alternativa que mais possibilita a obtenção de uma estrutura com propriedades melhores que nos outros processos de RT.

5.2.3.3 Desvantagens da Vacuum Casting

De acordo com a Arptech Prototyping Service (2007) a Vacuum Casting apresenta as seguintes desvantagens:

- as peças produzidas não são idênticas. Isto pelo fato de que as condições e o método de fabricação são diferentes;
- um único molde pode reproduzir de 15 a 20 peças apenas e na maioria dos casos, é necessário a produção de um novo modelo para fabricação do molde;
- secções de espessura muito pequenas não são recomendadas para esta tecnologia, devido à possibilidade de quebra ou trinca das peças.

5.2.4 Vacuum Bagging

De forma semelhante ao processo de Vacuum Casting, o Vacuum Bagging consiste na obtenção de um molde através da fabricação em meio ambiente de pressão negativa. Esta pressão é gerada através do bombeamento do ar para fora da cavidade do molde que é envolvido por um invólucro plástico fabricado a partir de um filme plástico resistente e fechado com uma fita para vedar o ambiente (MACARÃO JUNIOR; KAMINSKI, 2006).

5.2.4.1 Método da Vacuum Bagging

Conforme exposto no texto anterior o Vacuum Bagging é um processo que ocorre em um meio ambiente de pressão negativa. O molde é envolvido por uma membrana ou invólucro de plástico a uma pressão acima de 100 kPa. Este valor de pressão pode ser considerado pequeno, mas ao considerar uma peça de dimensões equivalentes a 100 x 220mm sobre 558mm de mercúrio (76 kPa), isto pode ser traduzido em uma pressão de 22.000 kg de força uniformemente distribuída sobre a peça (REINFORCED PLASTICS, 1992). Desta forma, a camada de material é constantemente comprimida sobre a parede do molde.

Existem três componentes essenciais neste processo. O vácuo, o calor e a pressão. A pressão compacta a camada de material sobre a superfície do molde; o vácuo retira o ar remanescente na estrutura do material e o calor contribui para a cura do material (COMPOSITE ABOUT, 2007).

De acordo com Fouquet (1996) apud Macarrão Junior (2004) recomenda-se a limitação do vácuo para que este não danifique o molde durante o processo. Neste caso, deve-

se reforçar o molde e arredondar seus vértices. Além disso, a proteção do conjunto (molde e material a ser laminado) com material macio é necessária para evitar a perfuração do invólucro.

Também segundo Ross (1992) apud Macarrão Junior (2004) “[...] 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 [...]”.

O objetivo desta manta é absorver o excesso de material, bem como facilitar o fluxo de ar par os bicos de sucção. Isto evita a formação de bolhas de ar na peça (MACARRÃO JUNIOR, 2004).

Após a cura do material sobre o molde, o conjunto é então retirado do invólucro e a peça é retirada do molde. Para a retirada da peça, pode-se previamente marcar o seu perímetro com uma tinta (caneta) e recortá-la após a conclusão do processo. Dependendo da exigência e grau de precisão, a peça pode ser simplesmente recortada e extraída do molde.

5.2.4.2 Vantagens da Vacuum Bagging

De acordo com a Reiforced Plastics (1992) a Vacuum Bagging apresenta as seguintes vantagens:

- processo capaz de gerar peças com alta qualidade;
- redução de peso nas peças produzidas;
- estrutura entrelaçada do material em fibra, o que permite maior resistência.

Macarrão Junior e Kaminski (2006) também identificam as seguintes vantagens deste processo:

- não há limites para o tamanho das peças a serem produzidas por este processo;
- fabricação do molde em um prazo muito pequeno, quando comparado ao prazo de fabricação dos ferramentais definitivos de produção.
- as peças produzidas por este processo podem ser utilizadas nas diversas fases do processo de desenvolvimento de produtos, inclusive na fabricação de peças em série.

Composite About (2007) também identifica como uma vantagem da Vacuum Bagging a disponibilidade dos materiais necessários para sua execução em várias fontes e distribuidores.

5.2.4.3 Desvantagens da Vacuum Bagging

De forma análoga, Macarrão Junior e Kaminski (2006) identificam como uma limitação ou desvantagem deste processo a necessidade de mão de obra especializada para realizar a laminação das peças ou do molde.

5.2.5 Moldes metálicos obtidos por sinterização “Keltool”

Este processo foi inicialmente desenvolvimento pela empresa Tartan Tooling e pela empresa 3M, sendo adquirido posteriormente em 1996 pela empresa 3DSystems, e conhecido desde então pelo nome 3D Keltool (UNINOVA, 2007).

5.2.5.1 Método da “Keltool”

A Keltool baseia-se na fabricação de insertos de aço pelo processo de sinterização. seletiva a laser (SL) a partir da utilização de pós metálicos. (UNINOVA, 2007).

O processo apresenta duas formas de fabricação para obtenção do molde ou ferramenta. A primeira forma consiste na obtenção direta do modelo negativo já na forma de inserto que é gerado a partir da sinterização seletiva a laser (SL). De forma análoga aos processos diretos apresentados anteriormente, este processo utiliza o modelo gerado em SL para gerar um modelo positivo em silicone (FRF ON LINE, 2007; VOLPATO et al, 2007).

O molde é então posicionado em um recipiente que é recoberto com uma mistura de pó metálico e aglutinante, similar ao processo de RTV.

Após a cura do aglutinante, o inserto é obtido em uma condição conhecida como peça verde. Para finalização do processo, o inserto é submetido a aquecimento em um forno apropriado onde o aglutinante é então eliminado e a peça é sinterizada (CHEAH et al, 2005).

Na segunda forma deste processo um modelo positivo da peça é primeiramente gerado. Da mesma forma, este modelo é colocado em um recipiente para a fabricação de um modelo negativo da peça em silicone. Após esta etapa, o processo de fabricação possui as mesmas características do primeiro processo já descrito (FRF ON LINE, 2007; VOLPATO et al, 2007).

5.2.5.2 Vantagens da “Keltool”

Para este processo foram identificadas as vantagens descritas a seguir:

- grande durabilidade das ferramentas, em torno de 1 milhão de injeções em materiais plásticos (ZHOU; HE, 1999; CHEAH, 2005);
- elevada precisão e elevado volume de moldagens (VOLPATO et al, 2007).

5.2.5.3 Desvantagens da “Keltool”

Da mesma forma as seguintes desvantagens ou limitações foram identificadas neste processo:

- a fabricação de moldes e insertos apenas para peças de pequenas dimensões (CHEAH et al, 2005);
- a disponibilidade desta tecnologia apenas em uma única fonte fornecedora (VOLPATO et al, 2007).

5.3 Seleção dos processos de ferramental rápido estudados

De forma análoga ao capítulo 4, os processos de RT estudados neste capítulo serão selecionados com base nos atributos apresentados na subseção 3.7 e no sumário apresentado na tabela 5.1.

A tabela 5.1 apresenta um sumário das tecnologias de ferramental rápido (RT) bem como as principais informações sobre cada processo.

Tabela 5.1 Sumário das tecnologias de ferramental rápido (RT)

Nome do processo	Direct AIM	RapidTool	DirectTool	DirectCast (1)	Moldes de Epox	Moldes de silicone		Vacuum Bagging (3)	Keltool
			Aço			Vacuum Casting (2)	RTV		
Fornecedores	Robtec	Robtec	AMS	AMS	Diversos		Diversos		Robtec
Período de fabricação	1 semana	3 a 4 dias para insertos sem acabamento; 5 a 10 dias se for requerido acabamento; 2 a 5 semanas (prazo típico)	1 a 2 semanas	de 28 a 39 horas (peças pequenas)	1 a 4 semanas	1 a 3 semanas	0,5 a 2 semanas	Algumas horas (para um molde de uma peça simples de 0,1 m2, o tempo é de aproximadamente 8 horas de trabalho)	1 a 6 semanas
Quantidade de peças moldadas por molde	10 a 50.	Centenas de peças fundidas de Zn, Al, Mg; centenas de milhares nos termoplásticos mais usuais.	Centenas de peças fundidas; centenas de milhares nos termoplásticos mais usuais.	200 peças para produção em série (por ano).	Centenas de peças complexas; Milhares de peças simples.	15 a 20.	10 a 50.	até 120 peças.	50 a milhares.
Materiais usualmente moldados	Termoplásticos de baixa temperatura de moldagem e não reforçados com carga.	Termoplásticos, metais.	Termoplásticos, metais.	Plásticos; Metálicos.	Termoplásticos .	Termoplásticos; Nylon de alta densidade.	Poliuretanos, epóxis, acrílicos.	Fibra de vidro; Fibra de carbono; Resinas epóxi.	Termoplásticos.
Vantagens do processo	Fabricação direta de moldes	Moldes por vazamento; pode-se usar temperatura e pressões de injeção típicas	Não requer extração do material aglutinante; precisão e acabamento superficial vêm melhorando com novos materiais que vêm sendo desenvolvidos	excelentes resultados com a utilização de alumínio e magnésio como materiais de construção; aplicações em materiais como ferro e aço; os grãos sinterizados não requerem o modelamento de canais de ar em ângulo.	Molde de custo relativamente baixo	redução de custos no desenvolvimento de produtos; melhor qualidade e acabamento do protótipo; elimina longo tempo de entrega.	Molde de custo relativamente baixo	processo capaz de gerar peças com alta qualidade; redução de peso nas peças produzidas; estrutura entrelaçada do material em fibra, o que permite maior resistência; não há limites para o tamanho das peças a serem produzidas por este processo.	Elevada precisão; Volume elevado de moldagens
Limitações do processo	Muitas limitações quanto aos materiais possíveis de moldar e processos de fabricação do molde.	Necessita de etapas posteriores de extração do material aglutinante, sinterização e infiltração de material adicional; pode necessitar de usinagem de acabamento; limitações quanto ao uso de canais *conformal cooling*, devido à fácil remoção do pó não sinterizado pelo laser nos canais mais complexos.	Pode necessitar de usinagem de acabamento; limitações quanto ao uso de canais *conformal cooling*, devido à difícil remoção do pó não sinterizado pelo laser nos canais mais complexos.	necessita de equipamento específico para o processo; produção de pequenos lotes; produção de peças relativamente pequenas; limitada a produção de peças em materiais metálicos.	Tempos longos de ciclos de moldagem; Vida do molde; Precisão, melhor para peças simples.	as peças produzidas não são idênticas. Isto pelo fato de que as condições e o método de fabricação são diferentes; secções de espessura muito pequenas não são recomendadas para esta tecnologia, devido a possibilidade de quebra ou trinca das peças.	Vida do molde; Precisão melhor para peças simples; Limitado número de materiais.	necessidade de mão de obra especializada para realizar a laminação das peças ou do molde.	Dimensões das peças; Único fornecedor.

[1] DirectCast: para as informações citadas na tabela 5.1 a seguinte fonte foi consultada: www.eos-gmbh.de. Acesso em: 22 nov. 2007.

[2] Vacuum Casting: para as informações citadas na tabela 5.1 a seguinte fonte foi consultada: http://www.plastico.com.br/revista/pm358/k2004_4.htm. Acesso em: 22 nov. 2007.

[3] Vacuum Bagging: para as informações citadas na tabela 5.1 a seguinte fonte foi consultada: MACARRÃO JUNIOR, L.; KAMINSKI, P. C. Vaccum bagging: fiber glass parts fabrication with quality. In: XV Congresso e Exposição Internacionais da Tecnologia da Mobilidade, São Paulo, Brasil, 21 a 23 de novembro de 2006, 1-6. SAE Technical Paper Series n. 2006-01-2609., 2006.

(Volpato et al, 2007 – adaptado pelo autor)

A partir das principais características apresentadas na tabela 5.1 e dos atributos de tamanho das peças protótipo, precisão dimensional e resistência mecânica os processos identificados capazes de atender estes requisitos são os processos de Vacuum Bagging e Direct Tool.

5.4 Análises e conclusões

Neste capítulo foram apresentadas as tecnologias de ferramental rápido comumente encontradas e utilizadas no mercado doméstico. Classificadas em dois grupos (diretos e indiretos) estas tecnologias possuem características comuns em termos de fabricação e capacidade de reprodução das peças.

Em concordância com as tecnologias de RP, os processos de RT mostram-se como uma alternativa para a obtenção de peças com baixo custo e curto prazo de fabricação quando comparados as técnicas tradicionais de fabricação de moldes e ferramentas.

Da mesma forma que nos processos de RP, a medição das peças produzidas pelos processos de RT se faz necessária.

No capítulo 6 um estudo de caso será realizado com base nos estudos desenvolvidos nos capítulos 4 e 5.

6 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso deste trabalho foi realizado de acordo com as seguintes etapas. Primeiramente, um fornecedor cadastrado nesta filial de montadora foi contatado. Em seguida, os modelos matemáticos de duas peças de um veículo produzido nesta filial de montadora foram entregues ao fornecedor, mediante a assinatura de um termo de confidencialidade.

Os arquivos foram entregues em uma mídia do tipo *compact disc* (CD), sendo o primeiro modelo do pára-lama, e o segundo modelo da porta dianteira externa, ambos no formato IGES. A figura 6.1 mostra os modelos matemáticos entregues ao fornecedor.

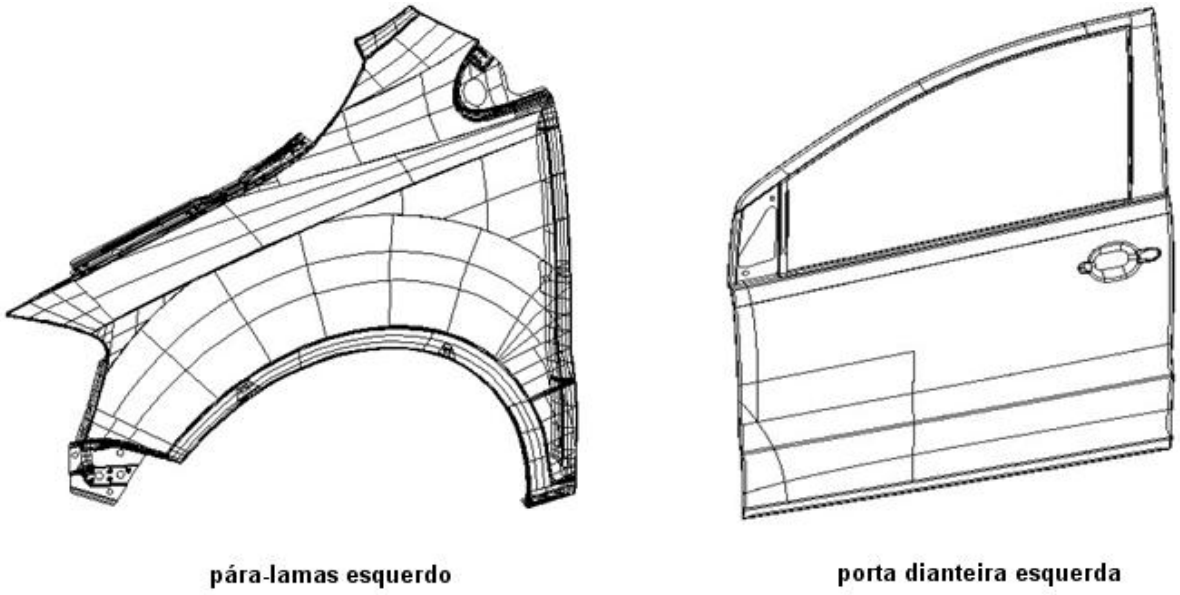


Figura 6.1 Modelos matemáticos em formato IGES (DOCUMENTAÇÃO INTERNA – adaptado pelo autor, 2007)

O fornecedor analisou os arquivos recebidos e elaborou um orçamento preliminar em duas alternativas. Na primeira alternativa, o fornecedor considerou a fabricação das amostras pelo processo de Vacuum Bagging.

Conforme já apresentado no capítulo 5 deste trabalho, o Vacuum Bagging é uma tecnologia disponível no processo indireto de ferramental rápido, onde se obtém a reprodução das peças através de um ferramental ou molde. Após a laminação do material construtivo sobre a ferramenta, o conjunto é submetido a um meio ambiente de pressão negativa, que proporciona melhor acabamento superficial, resistência mecânica e redução de peso, além de

não possuir restrições de tamanho das peças a serem reproduzidas. A tabela 6.1 mostra os valores preliminares apresentados pelo fornecedor.

Tabela 6.1 – Alternativa 1: valores preliminares

Tecnologia	Prototipagem Rápida - Processo Direto					
	Peças		Molde		Preço Final	
Processo	Vaccum Bagging		Rapid Tooling		Total por peça	
	Qtde	R$	Qtde	R$	Qtde	R$
Pára-lamas	1	609,76	1	21.929,82	10	28.027,42
Porta Dianteira Externa	1	1.048,78	1	40.570,18	10	51.057,98
						79.085,40

Na segunda alternativa, o fornecedor considerou a fabricação das peças a partir do processo de sinterização seletiva a laser (SLS). Neste processo, as peças são fabricadas de forma direta, sem a necessidade de um ferramental, fazendo com que o processo inicie um novo ciclo de fabricação para a obtenção de mais peças. A tabela 6.2 mostra os valores preliminares desta alternativa.

Tabela 6.2 – Alternativa 2: valores preliminares

Tecnologia	Prototipagem Rápida - Sinterização Seletiva a Laser					
	Peças		Molde		Preço Final	
Processo	SLS		Rapid Tooling		Total por peça	
	Qtde	R$	Qtde	R$	Qtde	R$
Pára-lamas	1	50.438,60	0	0,00	1	50.438,60
Porta Dianteira Externa	1	98.684,21	0	0,00	1	98.684,21
						149.122,81

Para os demais processos selecionados nas subseções 4.6 e 5.3 o fornecedor foi consultado e apresentou como resposta as seguintes justificativas:

- estereolitografia (SL): necessidade de adição de reforços estruturais após a construção da peça protótipo para aumentar a sua resistência mecânica, uma vez que para esta dimensão de protótipo o material de construção se torna quebradiço;
- maior custo e tempo de fabricação quando comparado ao processo de Vacuum Bagging.

- modelagem por fusão e deposição (FDM). A velocidade de fabricação da peça protótipo por este processo é lenta quando comparada ao processo de Vacuum Bagging;
- de forma análoga ao processo de SL, as peças protótipo produzidas por FDM necessitam de reforços estruturais para aumentar a resistência mecânica.
- Direct Tool. O custo para fabricação do ferramental por este processo é maior quando comparado ao processo de Vacuum Bagging.

Após análise dos orçamentos apresentados pelo fornecedor pode-se concluir que o processo que possui maior vantagem financeira é o Vacuum Bagging. Ainda segundo o fornecedor Robtec (2008), para o caso das peças utilizadas no ensaio estático de embalagens o Vacuum Bagging é o processo que melhor atende os atributos de resistência mecânica e precisão dimensional apresentados na subseção 3.7, quando comparado ao processo de SLS.

Uma vez que as alternativas foram apresentadas, o fornecedor propôs a construção de 1 amostra do pára-lama para a realização dos ensaios necessários sem custos para esta filial de montadora.

Desta forma, a embalagem especial utilizada no estudo de caso deste trabalho foi a de acondicionamento e transporte de pára-lama. As peças acondicionadas na embalagem apresentada na figura 6.2 são peças de série, ou seja, peças fabricadas a partir de ferramentas definitivas.

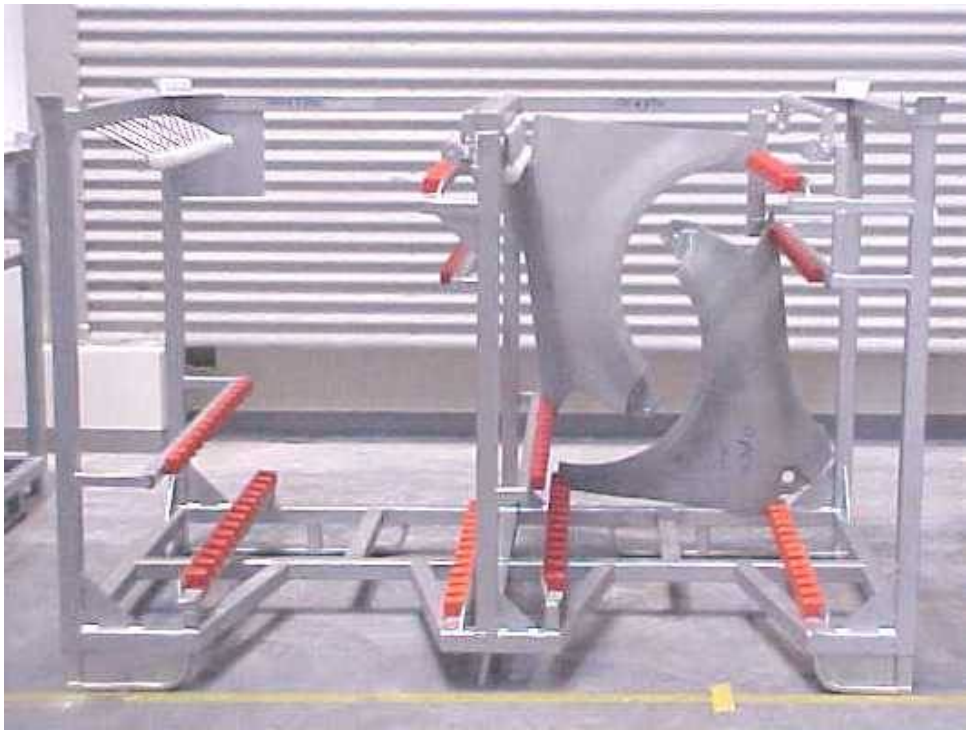


Figura 6.2 Embalagem para acondicionamento e transporte do pára-lama (DOCUMENTAÇÃO INTERNA, 2003)

6.1 Premissas básicas do projeto construtivo

Para a construção do ferramental, o fornecedor considerou basicamente dois aspectos. O primeiro refere-se aos atributos do projeto, ou seja, as características que a peça protótipo deve manter para sua aplicação no ensaio estático da embalagem. O segundo aspecto são as informações não relevantes, ou seja, que não influenciam no ensaio da embalagem.

6.1.1 Aspectos relevantes

Os aspectos relevantes que as peças protótipos devem manter para viabilizar a sua aplicação no ensaio da embalagem foram:

- forma geométrica da peça: a peça protótipo, independente do material em que for construída, deve manter sua geometria periférica conforme modelo matemático;
- aspecto superficial da peça: neste aspecto, é importante que a peça protótipo tenha um acabamento superficial semelhante ao da superfície da peça fabricada em chapa, porém, manchas e colorações diferentes são permitidas;

- resistência mecânica: a peça fabricada em RT deve possuir resistência mecânica suficiente para garantir as mesmas condições de abastecimento, travamento e retirada das peças da embalagem.

6.1.2 Aspectos não relevantes

De forma análoga a subseção 6.1.1, os aspectos não relevantes podem ser descritos de acordo com os tópicos a seguir:

- furos na peça: podem-se desprezar os furos que não interferem no processo de análise, como furos de flange ou de fixação da peça. Desta forma, a fabricação do ferramental pode ser simplificada, e seus custos podem ser ainda mais reduzidos;
- nervuras ou canais nos flanges: também podem ser desprezadas. Desde que se mantenham as dimensões geométricas periféricas da peça;
- peso da peça: neste caso o objeto em estudo é a embalagem, portanto, o peso da peça protótipo não interfere na análise da embalagem;
- partes côncavas ou internas da peça: pode-se permitir um acabamento superficial mais pobre, quando comparado à superfície aparente da peça.

Com estas condições definidas, o fornecedor iniciou o processo de fabricação do ferramental do pára-lama.

6.2 Fabricação do ferramental em RT

Para a fabricação do ferramental, a seguinte estratégica foi considerada. Em função do volume máximo da máquina utilizada, a ferramenta foi fabricada em duas partes. A primeira parte possui a secção inferior do pára-lama e a segunda parte a secção superior do pára-lama. A figura 6.3 mostra a estratégia adotada.

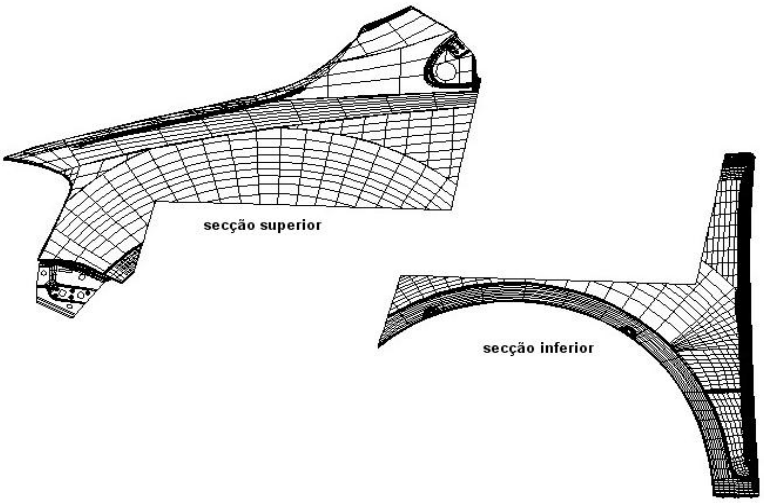


Figura 6.3 Secções superior e inferior do pára-lama

A partir desta definição o molde foi fabricado em um equipamento de usinagem do tipo *Computer Numerical Control* (CNC) – Controle Numérico por Computador (CNC). O material utilizado para o molde foi o poliuretano. Para esta aplicação, o poliuretano permite a passagem do ar pelo molde auxiliando o processo de refrigeração e retirada do ar. Outra vantagem da utilização do poliuretano é o baixo custo e boa usinabilidade. O tempo necessário para a fabricação do molde foi de aproximadamente 2 dias. Isto devido a prioridade de serviços a serem executados no equipamento, uma vez que para esta aplicação o fornecedor construiu o molde sem custos. As figuras 6.4, 6.5 e 6.6 mostram o molde fabricado.

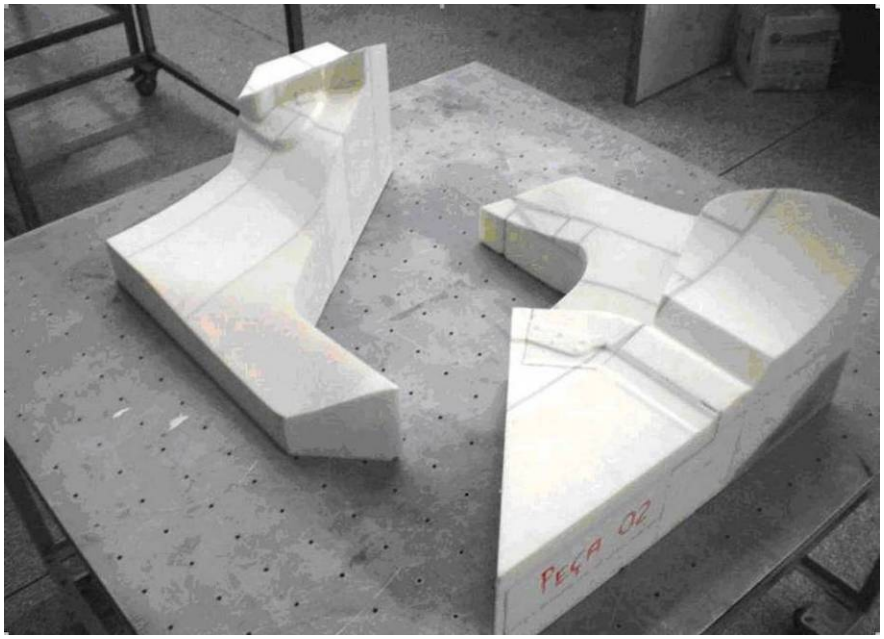


Figura 6.4 Divisão do molde em secções superior e inferior (ROBTEC, 2007)

Figura 6.5 Fabricação da ferramenta em RT. (ROBTEC, 2007)

Figura 6.6 Ferramental concluído (ROBTEC, 2007)

6.3 Fabricação da peça protótipo

O material utilizado para a fabricação da peça protótipo foi uma combinação de resina epoxy e um tecido especial de fibra de vidro. O tecido especial de fibra de vidro permite a obtenção de uma peça com espessura igual a 1,3mm ± 0,5 e com um peso aproximado de 2.7kg/m². A figura 6.7 mostra o processo de fabricação, a partir da inserção do molde dentro

de uma bolsa plástica perfeitamente vedada. Uma bomba de vácuo é conectada a bolsa, que tem como função principal a retirada do ar interno, gerando um ambiente a vácuo dentro da bolsa.

Figura 6.7 Bolsa plástica para gerar ambiente a vácuo (ROBTEC, 2007)

Após o tempo necessário para a cura do material que é de aproximadamente 12 horas, a peça pode ser retirada. A figura 6.8 mostra a peça concluída.

Figura 6.8 Peça protótipo finalizada

Com a peça protótipo finalizada, o ensaio estático da embalagem de acondicionamento e transporte de pára-lama pode ser realizado.

6.4 Ensaio estático da embalagem de pára-lama

Para a realização do ensaio estático da embalagem de pára-lama as seguintes premissas foram consideradas:

- a peça protótipo foi utilizada da mesma forma que a peça protótipo convencional, ou seja, sob as mesmas condições de manuseio necessárias durante o ensaio;
- a peça protótipo foi submetida às diferentes condições de acondicionamento existentes na embalagem;
- todos os pontos de apoio da peça protótipo nos separadores da embalagem foram verificados;
- todos os sistemas de travamento das peças na embalagem foram testados;
- as análises de passo e interferência entre as peças foram avaliadas;
- um comparativo entre a semelhança da peça protótipo utilizada e as peças de série acondicionadas na embalagem foi realizado.

A figura 6.9 mostra a peça protótipo acondicionada na posição inferior direita da embalagem. As demais peças acondicionadas são peças de série já em produção na montadora.

Figura 6.9 Peça protótipo acondicionada na posição inferior direita (vista de frente) da embalagem

A figura 6.10 mostra o ponto inferior de contato da peça protótipo com o separador da embalagem.

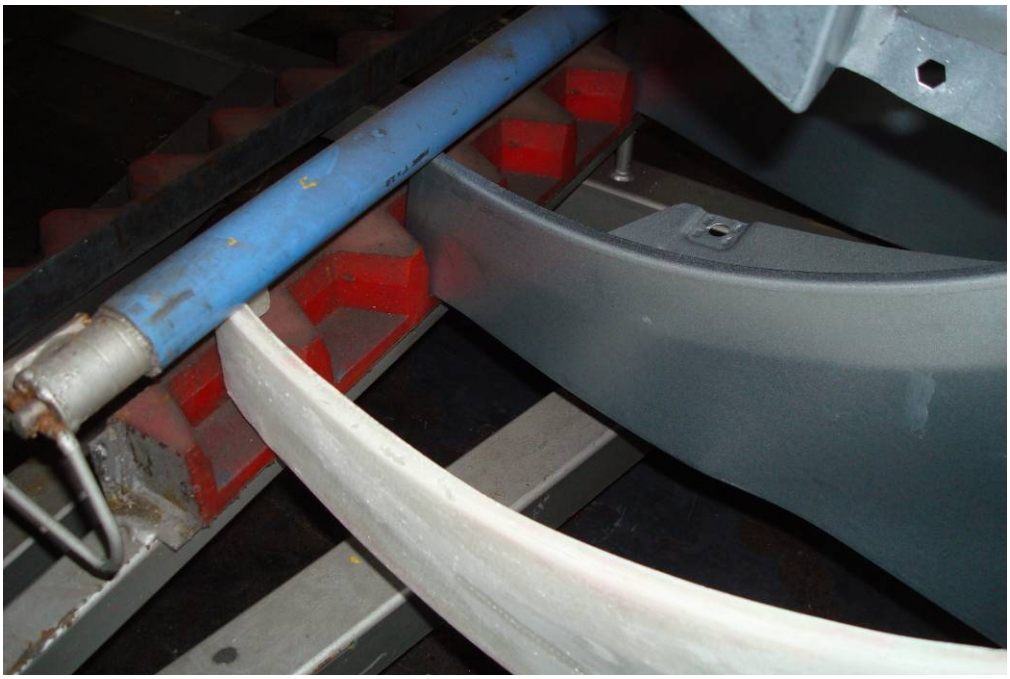


Figura 6.10 Análise do ponto de inferior de contato da peça com o separador da embalagem

A figura 6.11 mostra a análise do ponto superior de contato com o alojamento do farol da peça protótipo.

Figura 6.11 Análise do ponto superior de contato da peça com o separador da embalagem

A figura 6.12 mostra a análise do passo entre a peça protótipo e a peça de série.

Figura 6.12 Análise do passo

A figura 6.13 mostra a peça protótipo acondicionada na posição superior direita da embalagem.

Figura 6.13 Análise do acondicionamento na região superior direita da embalagem

Nesta condição é possível observar a similaridade entre as peças de série e a peça protótipo fabricada. A figura 6.14 mostra o detalhe do furo da peça que é utilizado para posicionar a peça nesta condição de acondicionamento.

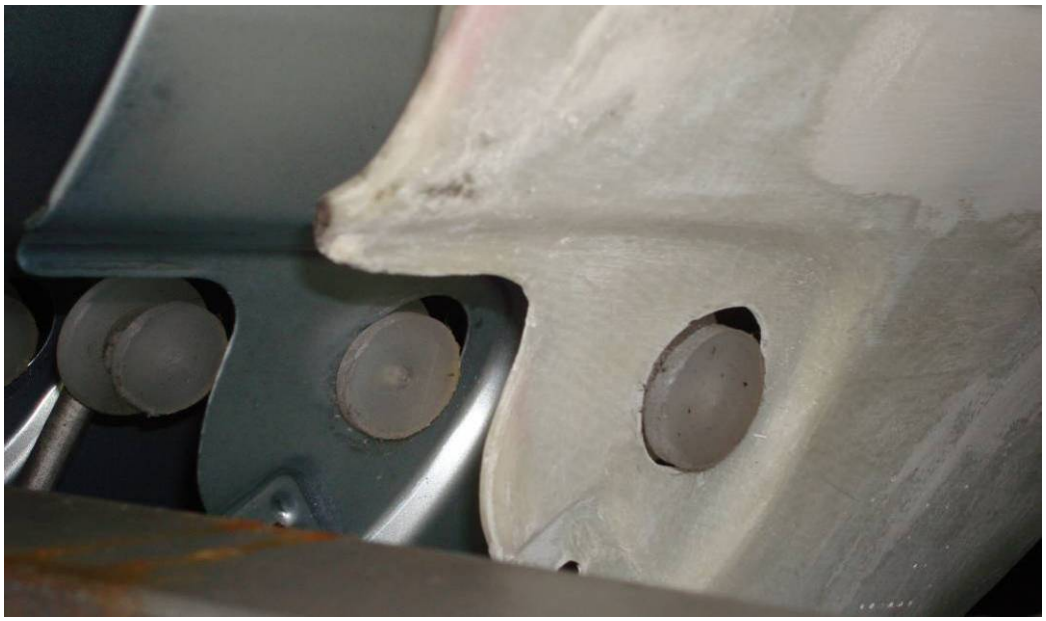


Figura 6.14 Detalhe do furo existente no produto utilizado nesta posição de acondicionamento

A figura 6.15 mostra a análise do passo entre as peças nesta posição de acondicionamento.

Figura 6.15 Análise do passo entre as peças

A figura 6.16 mostra o posicionamento da barra superior de travamento sob as peças acondicionadas. Por ser a primeira peça acondicionada, é possível observar posição da barra em relação à peça protótipo utilizada.

Figura 6.16 Análise do contato entre as peças acondicionadas

6.5 Conclusões do estudo de caso

Como conclusões do estudo de caso os seguintes pontos foram observados:

- as condições de acondicionamento testadas com a peça protótipo em Vacuum Bagging mostraram-se satisfatórias;
- com relação à ergonomia, a peça protótipo pode ser manuseada da mesma forma que as peças de série, porém, a peça protótipo apresenta maior rigidez em função da sua espessura, o que não comprometeu o manuseio e a análise;
- a peça protótipo apresenta boa geometria, o que possibilitou a análise do passo entre as peças, a análise dos pontos superiores e inferiores de apoio e a análise dos mecanismos de travamento das peças na embalagem;
- a aparência da peça protótipo não é relevante, no entanto, sua geometria é fundamental para este tipo de análise;
- o peso da peça protótipo é inferior ao da peça em chapa, porém, este fator não influencia a análise, conforme exposto na subseção 2.8;

- com exceção do furo existente no produto utilizado no posicionamento da peça no posição superior de acondicionamento, os demais furos existentes no produto não influenciam a análise da embalagem.

Os orçamentos preliminares apresentados pelo fornecedor são passíveis de negociação junto ao departamento de compras, que é responsável pela parte comercial desta filial de montadora. Portanto, em um processo convencional de cotação, ainda existe a possibilidade da redução dos valores apresentados.

Com base no estudo de caso apresentado, pode-se concluir que a peça protótipo do pára-lama fabricada em Vacuum Bagging atendeu as condições necessárias para o ensaio estático da embalagem selecionada.

7 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos com o estudo de caso apresentado no capítulo 6 estão classificados em qualitativos e quantitativos. Os resultados qualitativos são os referentes ao ensaio estático da embalagem e os aspectos da aplicação da peça construída pelo processo de RT (Vacuum Bagging). Os quantitativos são os referentes aos aspectos de tempo de aquisição e custo das peças protótipo.

7.1 Resultados qualitativos

Os resultados qualitativos estão consolidados na tabela 7.1.

Tabela 7.1 Comparativo entre o uso da peça protótipo convencional em a peça protótipo em RT.

Critérios	Peça protótipo convencional	Peça protótipo em RT
Manuseabilidade	Não existe uma preocupação elevada quanto ao manuseio. Colisões decorrentes do processo de análise são esperadas.	Existe uma preocupação inicial com o manuseio. Pelo fato da peça não ser fabricada em chapa, existe uma preocupação natural por parte do avaliador em evitar colisões, bem como manusear a peça com maior cuidado.
Utilização	Amplamente difundida. Pelo fato da peça ser igual a uma peça de série, não existe uma repulsa quanto a sua utilização.	Causa dúvidas em um primeiro instante, porém, quando acondicionada na embalagem seu uso se mostra eficiente, o que elimina qualquer sentimento de dúvida ou repulsa causado inicialmente.
Aceitação	Plena. Pelo fato da peça protótipo convencional ser igual a peça de série.	Boa. Por se tratar de um processo inovador, a peça em vacuum bagging mostrou-se eficiente, o que contribuiu para sua aceitação.
Aparência	Igual a peça de série.	Sem préstimo. Embora a superfície externa tenha um acabamento isento de rugosidade, as linhas de fabricação do molde são facilmente identificadas na peça em vacuum bagging. Na face interna da peça, a superfície apresenta rugosidade.
Funcionabilidade	Plena. Atinge todos os requisitos para o ensaio estático da embalagem.	Plena. Atinge todos os requisitos para o ensaio estático da embalagem.

A apresentação destes resultados se faz importante pois estes critérios podem se tornar um ponto de decisão quanto à utilização ou não da peça fabricada por RT. Geralmente, os trabalhadores da linha de produção observam somente os aspectos qualitativos, como por

exemplo a aparência da peça, e isto pode influenciar significativamente no processo de utilização da peça protótipo.

7.2 Resultados quantitativos

Os resultados quantitativos a serem apresentados são a base de estudo deste trabalho. A proposta de se estudar as tecnologias de prototipagem rápida (RP) e ferramental rápido (RT) como ferramentas para minimizar os tempos e os custos das peças protótipo são apresentadas através de um comparativo entre a situação convencional (atual da montadora) e a situação proposta, com a aplicação da tecnologia de ferramental rápido Vacuum Bagging.

Primeiramente, um comparativo entre os custos versus a quantidade de peças a serem produzidas nas situações convencional e proposta para a peça protótipo do pára-lama é apresentado de acordo com o gráfico da figura 7.1.

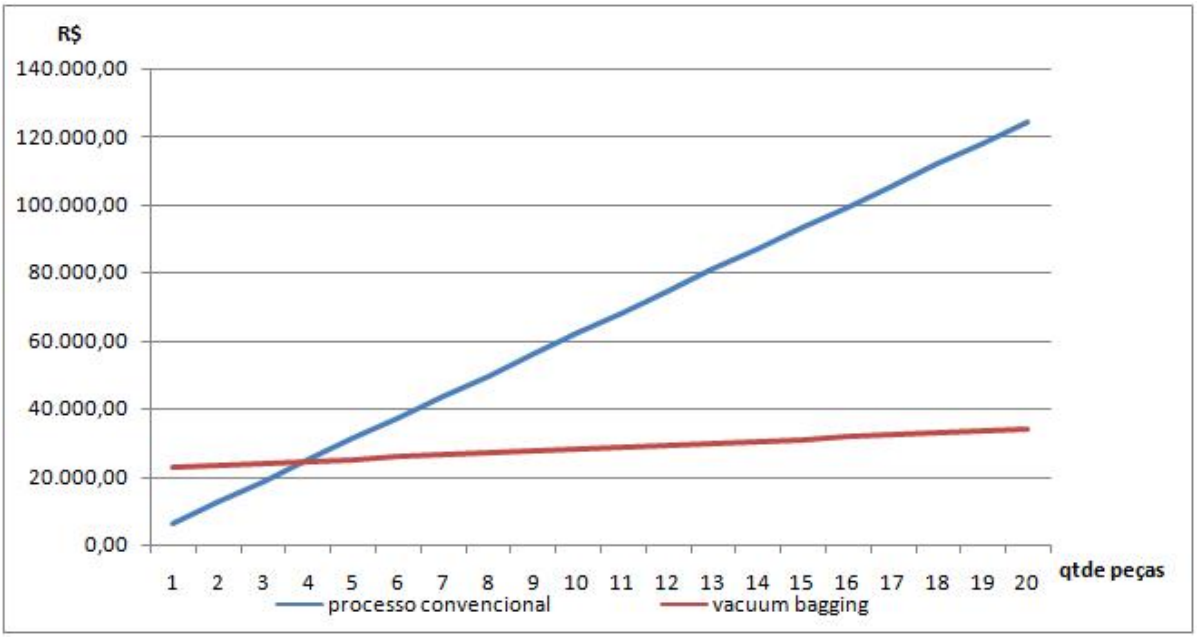


Figura 7.1 Comparativo para a peça protótipo do pára-lama

A metodologia de cálculo utilizada para a realização do comparativo apresentado considera as seguintes premissas:

- o custo calculado das peças em ambos os processos para um lote de 10 peças;
- a quantidade de peças a serem produzidas pelo molde ou ferramenta;
- o investimento em ferramental, apenas no processo de Vacuum Bagging, pois no processo convencional apenas as peças unitárias são adquiridas. No caso do processo

de Vacuum Bagging, o valor do ferramental deve ser contabilizado no preço unitário de cada peça.

Devido à grande quantidade de peças protótipo adquirida no processo convencional, o valor do investimento em ferramental torna-se desprezível, portanto, não é considerado. Isto faz com que este processo se torne inicialmente vantajoso em termos de custo quando comparado ao processo de RT. Porém, para a peça protótipo do pára-lama, a partir da quarta peça fabricada o processo de amortização do investimento em ferramental é iniciado, assim, o processo de RT se torna mais vantajoso em relação ao processo convencional.

Para o ensaio da embalagem, uma quantidade mínima de peças é necessária. Cada embalagem possui uma capacidade diferente de acondicionamento, que varia em função da geometria de cada peça. Sendo assim, o autor sugere que a quantidade de peças necessárias para a análise seja 50% da capacidade total de acondicionamento da embalagem. No caso da embalagem estudada do pára-lama, sua capacidade total de acondicionamento é de 48 peças. Desta forma, a quantidade necessária para o ensaio é de 24 peças. Portanto, com relação a custos o processo de RT é mais vantajoso.

O próximo comparativo apresentado é baseado no tempo de disponibilidade das peças protótipo para a realização do ensaio estático da embalagem. No processo convencional, o tempo de disponibilidade da peça protótipo é de 90 dias em média, conforme já mostrado na subseção 3.6 deste trabalho. Para o processo de RT, e com base no estudo de caso apresentado no capítulo 6, este tempo é reduzido significativamente.

No caso de construção de uma peça protótipo do pára-lama, a partir da construção do molde, o tempo total até a obtenção da primeira peça é de 15 dias. A figura 7.2 mostra um gráfico comparativo entre o processo convencional e o processo de RT para a peça protótipo do pára-lama.

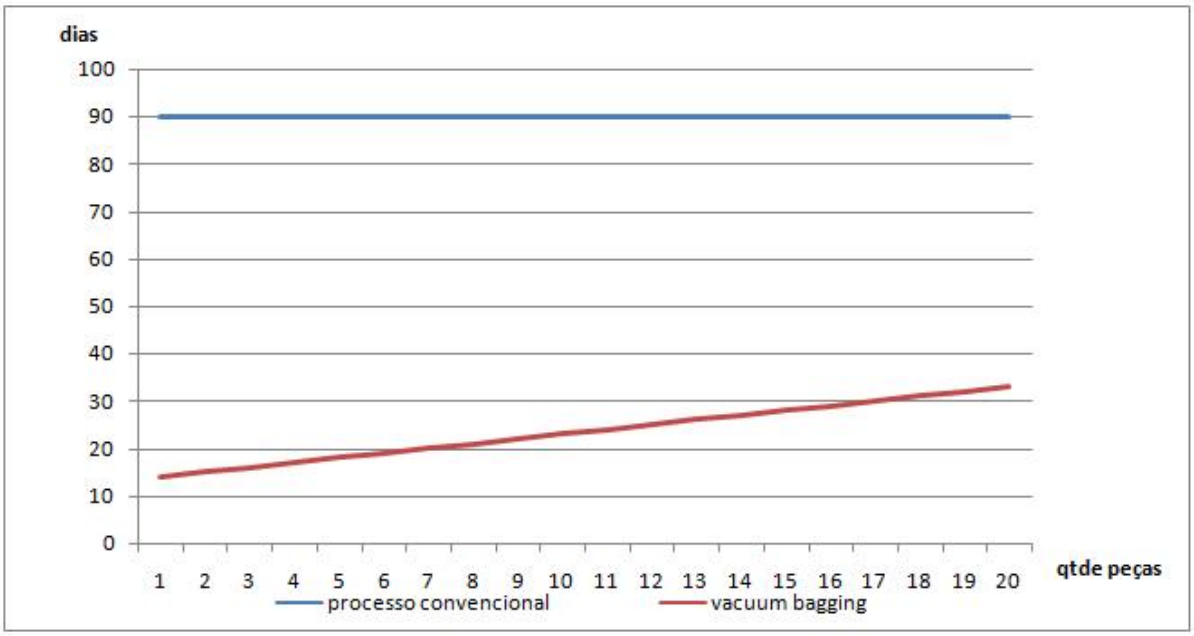


Figura 7.2 Comparativo de tempos versus quantidade de peças produzidas para a peça protótipo do pára-lama

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que no caso da peça protótipo do pára-lama o processo de RT reduz o tempo de disponibilidade da primeira peça protótipo em 76 dias. Isto significa uma redução de 84% no tempo e, portanto, um ganho para o processo de fabricação do lote de embalagens.

Cada peça fabricada em RT necessita de um dia para sua construção que se inicia na aplicação do material no molde até o tempo de cura para finalização do processo, que é aproximadamente 12 horas. Desta forma, as peças subseqüentes necessitam de um dia cada para fabricação e disponibilidade para uso, uma vez que o fornecedor encontra-se aproximadamente a 10 km da montadora.

Para as peças fabricadas pelo processo convencional, a variação de tempo não é considerada. O tempo é determinado de acordo com a estratégia de requisição de lotes do departamento de engenharia de protótipos, conforme exposto na subseção 3.1.

Como o lote de peças protótipo requisitado pelo departamento de PFME é pequeno quando comparado ao lote requisitado pelo departamento de engenharia de protótipos, o tempo de obtenção destas peças está em função da estratégia de requisição de peças adotada pela engenharia de protótipos e não pelo processo de fabricação da fonte fornecedora.

7.2.1 Comparativo entre os processos convencional e RT para as demais peças de superfície

Para as demais peças de superfície, o mesmo procedimento apresentado no capítulo 6 deste trabalho foi realizado. Os desenhos das demais peças foram entregues ao fornecedor mediante a assinatura de um termo de confidencialidade. Com base nos desenhos entregues, o fornecedor apresentou os valores mostrados na tabela 7.2.

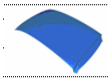
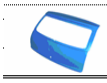
Tabela 7.2 Valores de custo e tempo de fabricação para as demais peças de superfície em RT

Peça	Qtde	Unit R$	Subtotal	Entrega
Teto	10	3.689,02	36.890,20	10 dias
Tampa dianteira	10	3.048,78	30.487,80	10 dias
Tampa Traseira	10	2.546,34	25.463,40	10 dias
Lateral LD	10	7.195,12	71.951,20	15-20 dias
Lateral LE	10	7.195,12	71.951,20	15-20 dias
Ferramentas				
Teto	1	42.381,58	42.381,58	35 dias
Tampa dianteira	1	30.945,18	30.945,18	35 dias
Tampa traseira	1	33.976,97	33.976,97	40 dias
Lateral LD	1	86.893,64	86.893,64	45 dias
Lateral LE	1	86.893,64	86.893,64	45 dias

Os valores apresentados são de caráter preliminar. Conforme já exposto no capítulo 6 deste trabalho, cabe ao departamento de compras da montadora negociar e apresentar os orçamentos a área técnica, neste caso o PFME.

A partir dos valores apresentados, o mesmo comparativo feito para a peça protótipo do pára-lama foi realizado. Os valores estão apresentados de duas formas. Na primeira forma se tem um comparativo dos custos e tempos nas condições convencional e a proposta (RT) para um lote de 10 peças, mostrados na tabela 7.3.

Tabela 7.3 Comparativo dos valores de custos e tempos de fabricação para as demais peças de superfície entre os processos convencional e RT

Peça	Denominação	Dimensões aproximadas [mm]	[mm]	[mm]	Tempo de fabricação em RP 10 peças	Custo em RP R$	Tempo de fabricação convencional 10 peças	Custo convencional R$	Diferença de tempo	Diferença de custo R$
	Lateral Externo 2P	2658	1303	255	55 dias	158.844,84	90 dias	145.240,00	35	(13.604,84)
	Teto	1700	1100	200	45 dias	79.271,78	90 dias	92.196,00	45	12.924,22
	Tampa Dianteira Externa	1347	1118	682	45 dias	61.432,98	90 dias	53.100,00	45	(8.332,98)
	Tampa Traseira Externa	1151	892	153	50 dias	59.440,37	90 dias	51.984,00	40	(7.456,37)

Na segunda forma um comparativo gráfico é apresentado para cada peça. Para este comparativo foi considerado um domínio de 20 peças. Os preços utilizados neste comparativo são válidos para um lote de 10 peças. Isto significa que existe a possibilidade de redução dos custos apresentados.

As figuras 7.3, 7.4, 7.5, 7.6 e 7.7 mostram um comparativo dos custos acumulados versus a quantidade de peças para as seguintes peças protótipo: porta dianteira externa; teto; tampa dianteira externa; tampa traseira externa e lateral externo.

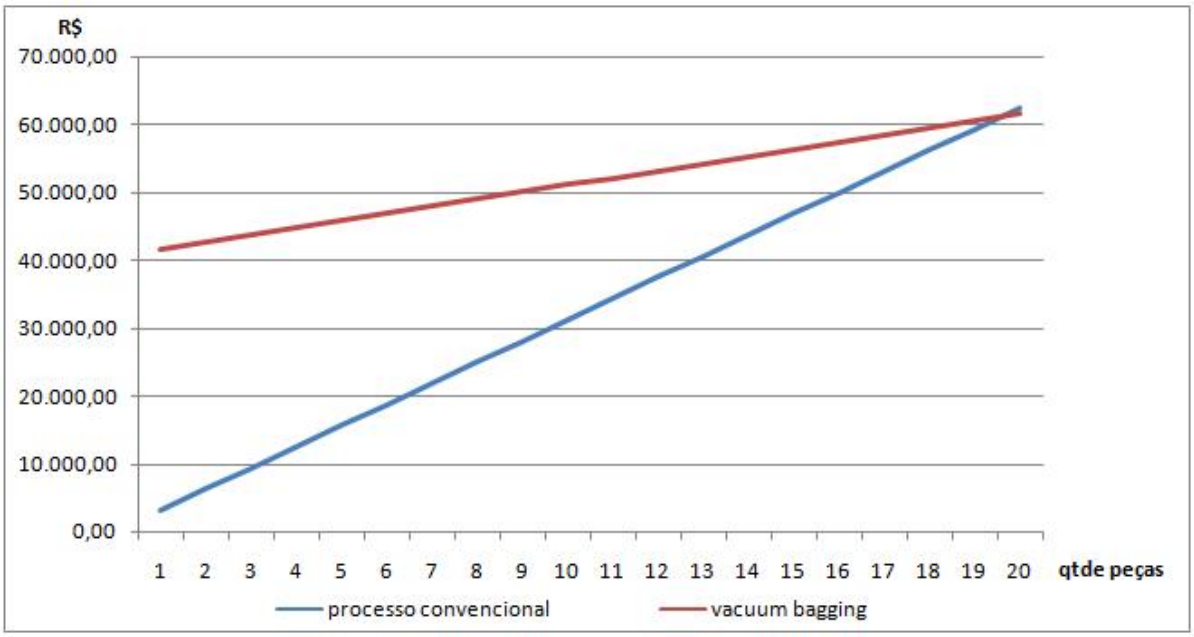


Figura 7.3 Comparativo para a peça protótipo da porta dianteira externa

Para a peça protótipo da porta dianteira externa, a vantagem econômica do processo de RT ocorre somente a partir da vigésima peça produzida. Para as embalagens de portas dianteiras externas dos modelos produzidos nesta montadora, a capacidade de acondicionamento das embalagens é em média de 30 peças.

O comparativo se repete para as demais peças de acordo com os gráficos subseqüentes.

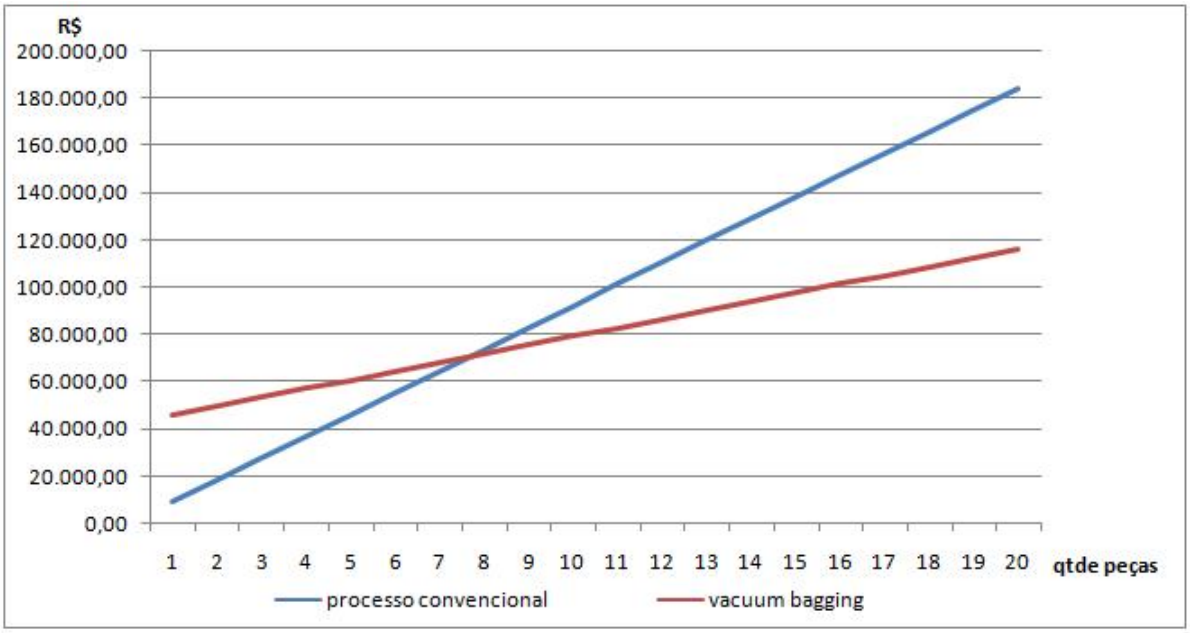


Figura 7.4 Comparativo para a peça protótipo do teto

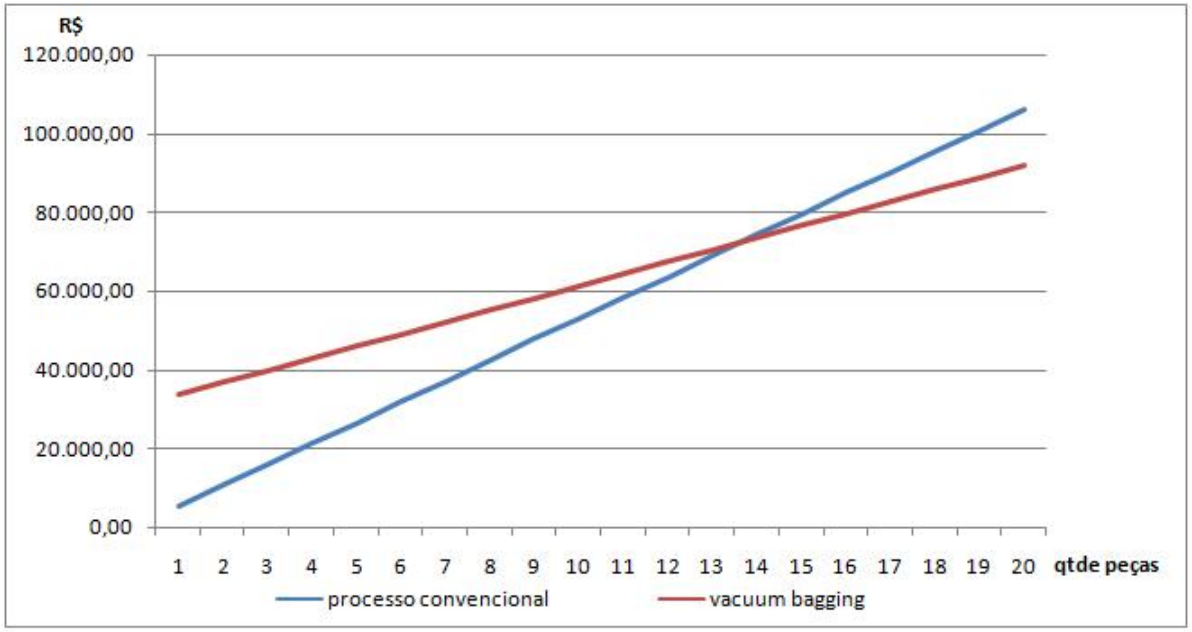


Figura 7.5 Comparativo para a peça protótipo da tampa dianteira externa

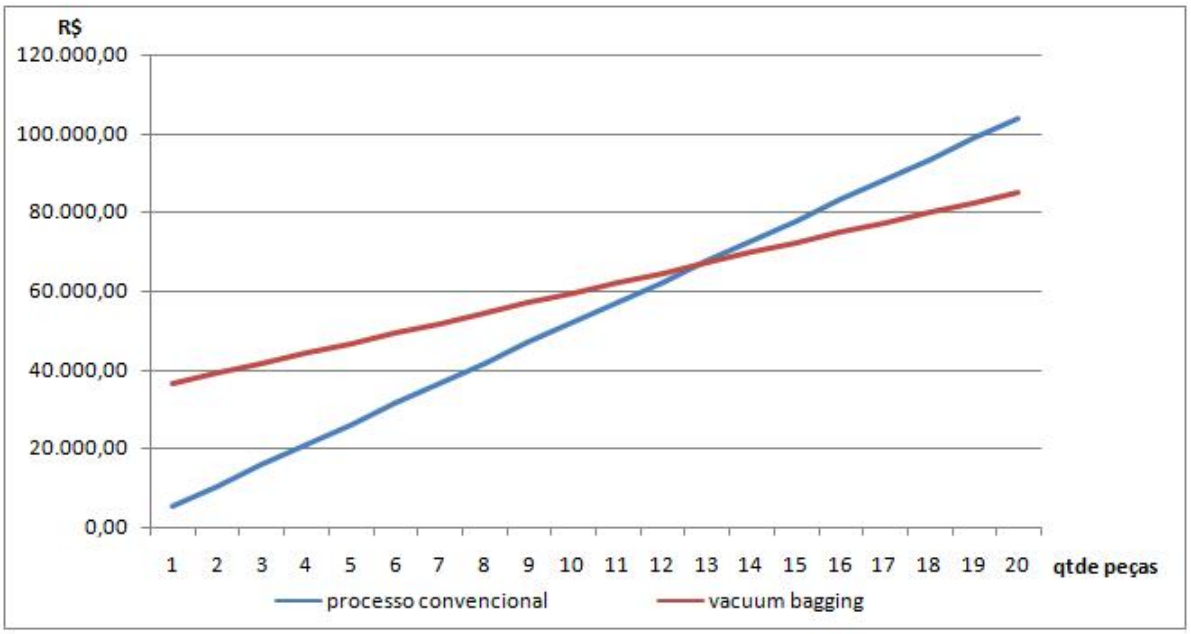


Figura 7.6 Comparativo para a peça protótipo da tampa traseira externa

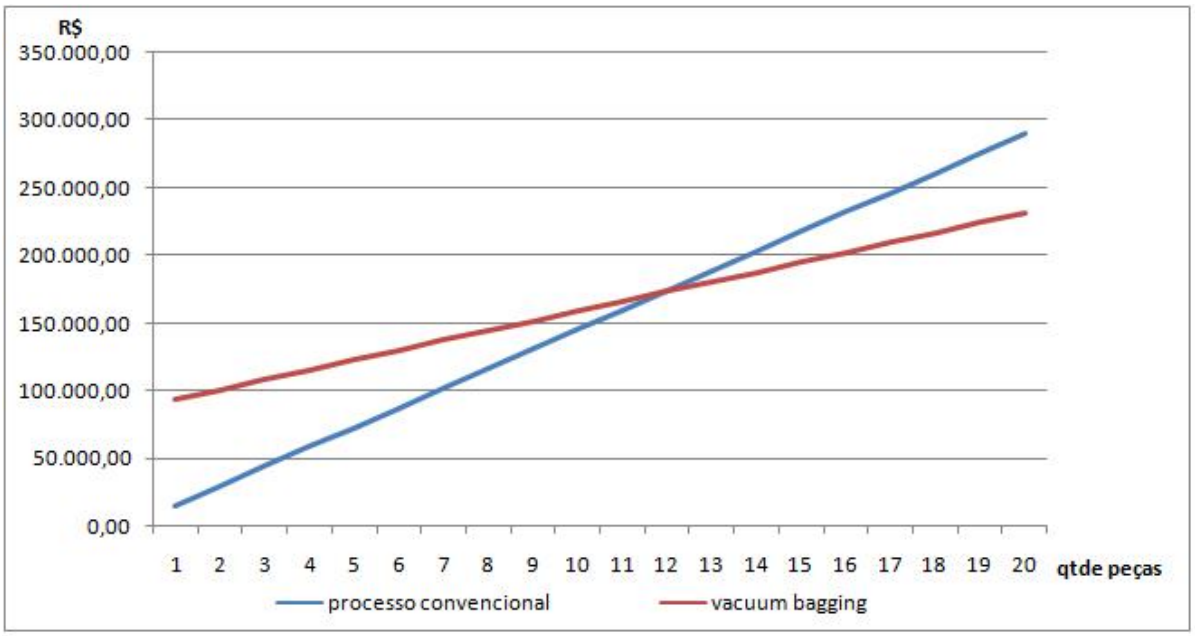


Figura 7.7 Comparativo para a peça protótipo do lateral externo

7.2.2 Os impactos da utilização do processo de RT no desenvolvimento de embalagens

Os resultados apresentados nas subseções 7.1 e 7.2 mostram as vantagens diretas da utilização do processo de RT para fabricação de peças protótipo utilizadas no ensaio estático das embalagens. A denominação direta se dá pelo fato de que o tempo de aquisição destas peças e o custo de cada peça protótipo são diretamente modificados com o uso do processo

proposto (RT). No entanto, existem outras partes do processo de desenvolvimento de embalagens que são afetadas com o uso da RT.

A seguir as outras etapas que são afetadas com o uso da RT no processo de desenvolvimento de embalagens são apresentadas.

7.2.2.1 Processo de aquisição das peças em RT

Para o processo convencional, o processo de aquisição das peças protótipo ocorre de acordo com o descrito na subseção 3.1.

O tempo médio para que a peça protótipo esteja disponível para uso é de aproximadamente 90 dias, conforme exposto na subseção 3.6.

Com relação ao custo de desenvolvimento da embalagem, o valor varia de acordo com a embalagem a ser projetada. De maneira estimada, desde o projeto da embalagem até a construção do protótipo físico, o custo de desenvolvimento está compreendido entre R$ 20.000,00 e R$ 40.000,00.

Para o processo proposto (RT), a aquisição das peças protótipo pode ocorrer em duas alternativas: na alternativa 1 se tem a aquisição das peças através de um pedido de compras do tipo fixo. Nesta alternativa, o tempo médio necessário para entrega das peças protótipo a partir da emissão da Solicitação de Compra é de aproximadamente 104 dias.

A figura 7.8 apresenta um comparativo entre os processos convencional e proposto com base na alternativa 1.

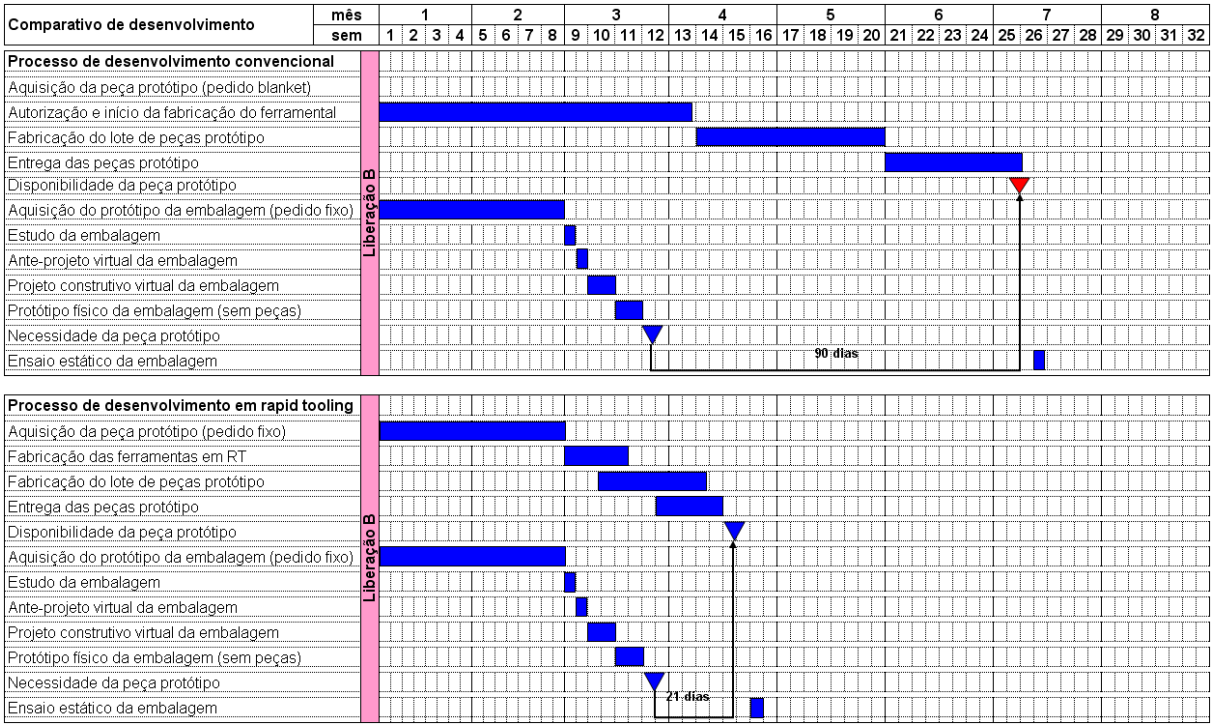


Figura 7.8 Comparativo entre os processos convencional e proposto para a alternativa 1

Para o comparativo apresentado na figura 7.8 foi considerado que os processos de fabricação das peças protótipo e o processo de aquisição do protótipo da embalagem se iniciam logo após a liberação B. Isto pelo fato de que a partir da liberação B o produto não sofre mais alterações, conforme exposto na subseção 2.3.2.

Na alternativa 1 é possível obter uma redução de 69 dias com o uso da peça protótipo em RT. No entanto, existe uma necessidade remanescente de 21 dias no processo de desenvolvimento do protótipo da embalagem, que necessita de peças protótipo para a realização do ensaio estático.

Os custos de desenvolvimento da embalagem também estão compreendidos entre R$ 20.000,00 e R$ 40.000,00. Isto porque nesta alternativa o processo de desenvolvimento da embalagem não se altera.

A alternativa 2 consiste em utilizar o pedido de compras do tipo *blanket* para aquisição das peças em RT. Esta alternativa considera que o pedido de compra já está negociado e colocado com o fornecedor, devido ao fato de que o pedido tem validade de 3 anos conforme descrito na subseção 3.1. A figura 7.9 mostra o comparativo realizado entre os processos convencional e proposto para a alternativa 2.

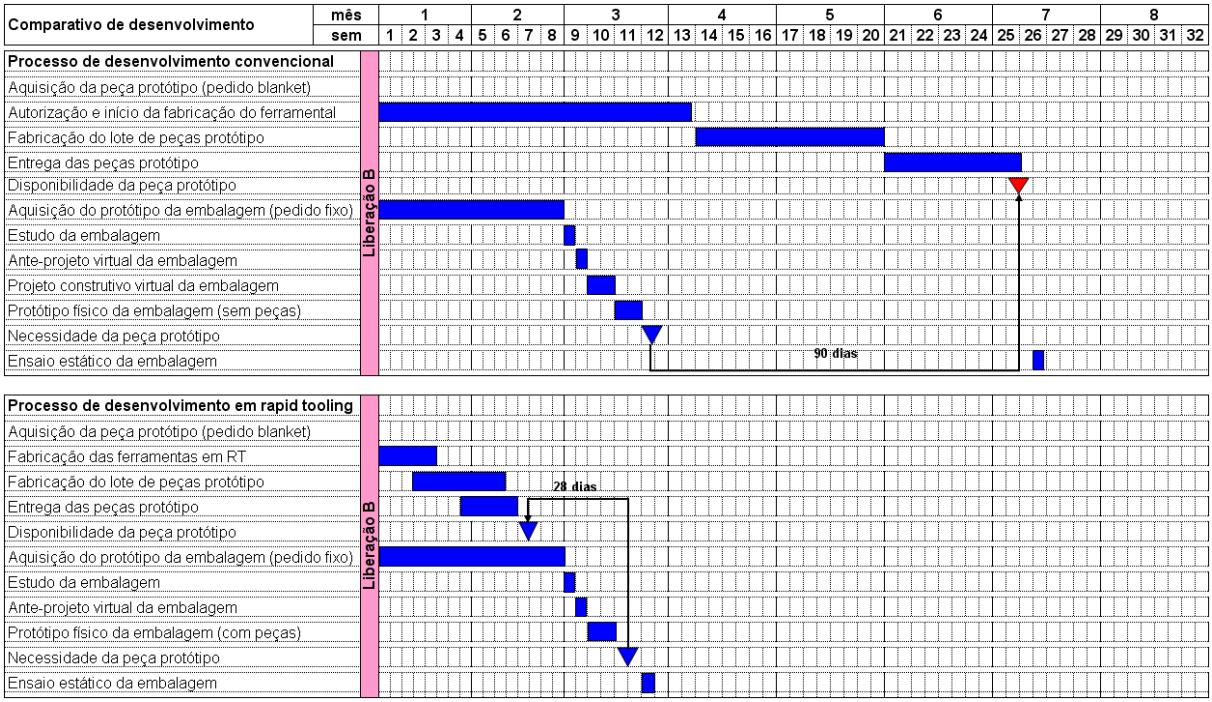


Figura 7.9 Comparativo entre os processos convencional e proposto para a alternativa 2

Na alternativa 2, é possível eliminar o atraso existente no processo convencional e antecipar a disponibilidade da peça protótipo em aproximadamente 28 dias, totalizando uma redução de 118 dias no processo de obtenção da peça protótipo.

Outra variável que colabora com a redução do tempo nesta alternativa é a aplicação direta da peça protótipo no desenvolvimento da embalagem. Esta aplicação permite o desenvolvimento do protótipo físico da embalagem a partir da peça protótipo física e do ante-projeto da embalagem, dispensando a etapa de desenvolvimento do protótipo virtual da embalagem.

Para esta forma de desenvolvimento, estima-se que o custo de desenvolvimento da embalagem tenha uma redução de aproximadamente 30%. Esta redução está relacionada com a dificuldade de se desenvolver a embalagem de forma virtual, em função da interface entre homem e embalagem. Assim, a partir da peça protótipo física, o desenvolvimento do protótipo físico da embalagem é feito de forma prática, permitindo uma melhor detecção de problemas nesta interface.

Com isto, estima-se que os custos de desenvolvimento da embalagem utilizando-se a peça em RT estariam compreendidos entre R$ 14.000, 00 e R$ 28.000,00.

7.3 Análises e conclusões

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que o uso da RT no processo de desenvolvimento das embalagens para acondicionamento e transporte de peças automotivas é funcional. Com isto é possível se obter a redução de tempo necessária para a realização dos ensaios estáticos das embalagens.

Com relação à redução dos custos diretos, ou seja, dos custos relacionados diretamente com o preço unitário de cada peça, a redução se aplica apenas a duas peças protótipo: o teto e o pára-lama. Porém, quando as reduções são contabilizadas de forma global, considerando também a redução de custos no processo de desenvolvimento das embalagens mostrado na alternativa 2 se tem uma redução em todas as peças, com exceção da embalagem da porta dianteira externa, conforme mostrado na tabela 7.4.

Dois aspectos se fazem importantes nesta conclusão: primeiramente, os custos apresentados no estudo de caso do capítulo 6 são preliminares, ou seja, são passíveis de negociação junto ao departamento de compras responsável da montadora. O segundo aspecto são os custos apresentados para as peças protótipo convencionais. Estes custos são válidos para o ano de 2007, período em que as peças foram adquiridas para o desenvolvimento das embalagens de um determinado modelo de automóvel da montadora.

Desta forma, os custos para as peças convencionais encontram-se com base no ano de 2007, enquanto que os custos para as peças em RT encontram-se com base no ano de 2008. Isto influencia o comparativo, pois os custos não estão no mesmo ano base, o que provoca uma distorção no resultado.

A tabela 7.4 mostra um sumário dos resultados apresentados neste capítulo. No capítulo 8 são apresentadas as conclusões e considerações finais.

Tabela 7.4 Sumário dos custos e tempos entre os processos convencional e RT

	peças de superfície	pára-lamas	porta dianteira	tampa dianteira	tampa traseira	lateral	teto
processo convencional	custo para 10 peças	62.244,00	31.176,00	53.100,00	51.984,00	145.240,00	92.196,00
	custo para desenvolvimento da embalagem	27.500,00	21.700,00	21.700,00	32.400,00	31.850,00	33.500,00
	tempo médio de disponibilidade (dias) da peça protótipo para um lote de 10 peças	180	180	180	180	180	180
	tempo médio (dias) para aquisição e desenvolvimento da embalagem	83	83	83	83	83	83
processo RT - alternativa 2	custo para 10 peças	28.027,42	51.057,98	61.432,98	59.440,67	158.844,84	79.271,78
	custo para desenvolvimento da embalagem	9.625,00	7.595,00	7.595,00	11.340,00	11.147,50	11.725,00
	tempo médio de disponibilidade (dias) da peça protótipo para um lote de 10 peças	25	45	45	50	55	45
	tempo médio (dias) para aquisição e desenvolvimento da embalagem	74	74	74	74	74	74
Diferença entre os processos	custo para 10 peças	**34.216,58**	**(19.881,98)**	**(8.332,98)**	**(7.456,67)**	**(13.604,84)**	**12.924,22**
	custo para desenvolvimento da embalagem	**17.875,00**	**14.105,00**	**14.105,00**	**21.060,00**	**20.702,50**	**21.775,00**
	tempo médio de disponibilidade (dias) da peça protótipo para um lote de 10 peças	**155**	**135**	**135**	**130**	**125**	**135**
	tempo médio (dias) para aquisição e desenvolvimento da embalagem	**9**	**9**	**9**	**9**	**9**	**9**

8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho é fundamentado em um problema real existente em uma filial de montadora instalada no Brasil. A partir da identificação do problema, uma solução proposta foi desenvolvida, através da utilização de métodos e técnicas de investigação científica, com base em pesquisa acadêmica e sistematização da literatura existente sobre o tema tratado. Como resultado disto, o trabalho atingiu os objetivos propostos.

Em complemento a esta finalização, algumas considerações se fazem importantes. O estudo das tecnologias de RP e RT foram fundamentais para suportar o estudo de caso. Sem o conhecimento prévio destas tecnologias não seria possível selecionar a tecnologia mais adequada para atender as necessidades deste setor (PFME).

Conforme descrito nos capítulos 6 e 7, os valores apresentados são passíveis de negociação e, portanto, de maior redução dos preços unitários das peças.

A aplicação da peça fabricada em Vacuum Bagging atendeu os requisitos necessários para a realização do ensaio estático da embalagem do pára-lama. Isto foi importante para a validação desta pesquisa.

Com relação às interfaces entre a montadora e o fornecedor, o estudo de caso possibilitou a fonte fornecedora uma abertura de novas oportunidades de negócio, uma vez que até o presente momento não se tem registro da aplicação de peças fabricadas por ferramental rápido no desenvolvimento de peças protótipo para ensaio de embalagens para peças automotivas.

Ainda com relação às interfaces, a troca de dados entre a montadora e o fornecedor não apresentou problemas. Os arquivos fornecidos no formato IGES foram utilizados sem a necessidade de retrabalhos. Isto se faz importante, pois no caso da necessidade de retrabalho dos arquivos de desenho, os custos teriam que ser repassados para as peças protótipo, onerando o projeto e aumentando o tempo no processo de fabricação das peças protótipo.

Para o caso de desenvolvimento de novos produtos, é importante a aferição das peças protótipo fabricadas em RP ou RT por um processo de medição tridimensional, a fim de comparar a peça física com o desenho de produto fornecido.

Para isto duas condições para realização desta aferição são recomendadas: a primeira consiste em uma análise tradicional de medição, onde se posiciona a peça em uma mesa padrão e uma máquina composta por um sistema de coordenadas (x, y e z) realiza a medição, seja por meio mecânico ou automático. A segunda maneira consiste no processo reverso, ou

seja, a partir da digitalização da peça física em RT, gera-se um arquivo eletrônico e, portanto, possível de ser comparado com o desenho de produto.

Isto é extremamente importante, pois desvios dimensionais podem resultar em um desenvolvimento errado da embalagem e, por conseguinte, em perda de custo e tempo de desenvolvimento.

Com relação ao processo de aquisição das peças em RT, o mesmo pode ser realizado através de uma Solicitação de Compra (SC), conforme procedimentos internos da montadora. Este processo já é utilizado no departamento de desenvolvimento de embalagens (PFME) para a aquisição de outros meios e instalações para a montadora. Desta forma, o processo de compra das peças em RT ficaria sob responsabilidade do PFME, o que também auxiliaria na redução do tempo de aquisição e disponibilidade das peças protótipo para o ensaio das embalagens.

Outra vantagem deste processo é o acompanhamento do processo de fabricação das peças através de visitas técnicas na fonte fornecedora, uma vez que no processo convencional isto não ocorre. Este acompanhamento permite que decisões importantes sejam tomadas como por exemplo: a importância de reprodução de um determinado detalhe da peça no molde; prioridades de fabricação, troca de informações, entre outras decisões.

8.1 Estudos futuros

Durante a elaboração deste trabalho, as seguintes necessidades que podem ser descritas como sugestões para estudos futuros foram identificadas.

A dificuldade de se obter informações precisas sobre os processos de prototipagem rápida e ferramental rápido durante a elaboração dos capítulos 4 e 5 foi grande. Atualmente, parte da literatura existente sobre o tema descreve os comparativos entre os processos de forma qualitativa, como por exemplo: o processo A apresenta vantagens ou desvantagens quando comparado aos demais processos de prototipagem rápida. Estas vantagens ou desvantagens nem sempre são identificadas. Isto dificulta a seleção do melhor ou dos melhores processos para uma determinada aplicação.

Também com relação aos materiais de construção, poucos processos apresentam informações detalhadas como composição química da matéria prima ou custos envolvidos nos processos.

Em face destas dificuldades, o autor identifica como uma necessidade para estudos futuros o detalhamento das propriedades dos processos de prototipagem rápida e ferramental

rápido de forma qualitativa. Assim, a elaboração de um trabalho de pesquisa que contemple os aspectos técnicos de forma sistêmica e organizada permitirá o acesso rápido a informações precisas, auxiliando na seleção dos processos de acordo com as necessidades de cada aplicação.

A ausência de uma pesquisa específica sobre embalagens especiais para acondicionamento e transporte de peças automotivas também foi identificada. Até o presente momento, os dados existentes sobre o tema são apresentados de forma resumida e generalizada. Portanto, a necessidade de um trabalho de pesquisa que oriunda uma literatura específica sobre este tema é também importante.

Ainda com relação às embalagens abordadas neste trabalho, a aplicação da prototipagem rápida no desenvolvimento de separadores das peças da embalagem também deve ser estudada. Atualmente, determinados fornecedores responsáveis pelo desenvolvimento da embalagem terceirizam esta atividade a firmas especializadas no desenvolvimento de componentes em poliuretano ou materiais similares. O problema existente nestes produtos é que a repetibilidade dimensional dos separadores nem sempre é atendida. Muitas vezes, separadores defeituosos instalados na embalagem colaboram com o acondicionamento incorreto e em determinados casos, provocam riscos e amassados nas peças.

Outra proposta para estudos futuros é a aplicação das peças protótipo estudada neste trabalho em outros departamentos da montadora. Embora cada departamento tenha suas necessidades e aplicações específicas, a proposta de utilização destas peças como um meio para redução de tempos e custos mostra-se como uma alternativa viável.

Como consideração final espera-se que o conteúdo desenvolvido neste trabalho sirva de base para o início de uma nova forma de desenvolvimento de embalagens especiais neste setor (PFME), e que esta inovação tecnológica auxilie na melhoria destes processos, de forma que os resultados alcançados possam colaborar com o aumento da competitividade desta montadora.

REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2000.

ARAÚJO, V.; OLIVEIRA, M. A.; PEREIRA, C.; GOMES, G. S. **Guia de embalagens universais de peças compradas para produção**. Documento eletrônico da montadora para orientação de fornecedores, 3.ed. São Bernardo do Campo, 2005.

ARPTECH PROTOTYPING SERVICE. **Vacuum casting service**. Disponível em: http://www.arptech.com.au/services/vcsrv.htm. Acesso em 07 nov. 2007.

BARETA, D. R.; COSTA, C. A.; BAUMVOL, I. J. R.; POUZADA, A. S. **Aplicação de materiais alternativos em moldes híbridos de injeção**. In: CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais,17., Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 15 a 19 de Novembro de 2006, p.1-12, 2006.

BATHE, K. J. **Numerical methods in finite element analysis**. Prentice-Hall, 1976.

BOWERSOX, J.; D, DAVID, J. C. **Logistical management: the integrated supply chain process**. The McGraw-Hill Companies, 1996.

BYUN, H.; LEE, K. H. **Determination of the optimal build direction for different Rapid Prototyping processes using multi-criterion decision making**. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, v.22, p.69-80, 2006.

CHEAH, C. M.; CHUA, C. K.; LEE, C. W.; FENG, C.; TOTONG, K. **Rapid Prototyping and tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.25, p.308-320, 2005.

CHUA, C. K.; CHOU, S. M.; WONG, T. S. **A study of the state-of-the-art Rapid Prototyping technologies**. Advanced Manufacturing Technology ,v.14, p.146-152, 1998.

COMPOSITE ABOUT. **Vacuum Bagging: basics**. Disponível em: http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/l/aa000109.htm. Acesso em 03 nov. 2007.

EOS GMBH. **Processos de prototipagem rápida**. Disponível em: http:// www.eos-gmbh.de. Acesso em 13 jun. 2007.

ERGONET. **Prevenção as LER/DORT**. Disponível em: http://www.ergonet.com.br/download/datafolha-ler.pdf. Acesso em 15 nov. 2007.

FERREIRA. A. B. H. **Novo dicionário Aurélio da língua portuguesa**. Curitiba: 3. ed. Positivo, 2004.

FRF ON LINE. **Rapid Tooling\Processos Indirectos\3D Keltool**. Disponível em: http://www.frfonline.com/site/pages/page_detail.php?page_id=300. Acesso em 20 out. 2007.

FORTE, S. H. A. C. **Manual de elaboração de tese, dissertação e monografia**. Gráfica UNIFOR, 2004.

GUITIÁN, R. **Evolução dos conceitos de polímero e de polimerização**. Plástico Moderno, São Paulo, n.247, setembro, p.28-32 (1994).

GURGEL, F. A. **Administração da embalagem**. 1. ed. São Paulo: Thomson Learning , 2007.

HANUMAIAH, N., RAVI, B., MUKHERJEE, N. P. **Rapid Hard Tooling Process Selection using QFD-AHP Methodology**. In: Journal of Manufacturing Technology Management, v.17, n.3, p.332-350, 2006.

HENRIQUES, J. R. **Contribuição para otimização da troca de dados geométricos entre sistemas CAD utilizando processadores STEP AP214**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara D'Oeste, 2003.

JETLEY, S.; LOW, D. K. **A Rapid Tooling technique using a low melting point metal alloy for plastic injection molding**. Journal of Industrial Technology, v.22, p.1-8, 2006.

KAI, C. C.; JACOB, G. K.; MEI, T. **Interface between CAD and Rapid Prototyping systems**. Part1: a study of existing interfaces. Advanced Manufacturing Technology, v.13, p.566-570, 1997.

KAMINSKI, P. C. **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2000.

KRUSCHWITZ, R.; DUSKE, J. **Manual do processo de desenvolvimento do produto**. Documentação de uso interno da montadora, 2004.

LENCINA, D. C. **Fabricação rápida de ferramentas produzidas por estereolitografia e recobertas com níquel-fósforo depositado por eletroless – com estudos de caso em moldagem de plásticos por injeção e fundição em areia aglomerada por resinas do tipo caixa fria.** Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MA, S. GIBSON, I.; BALAJI, G.; HU, Q. J. **Development of epoxy matrix composites for Rapid Tooling applications**. Journal of Materials Processing Technology, v.192-193, p.75-82, 2007.

MARTINS, J. R. **Manufatura rápida – avaliação das tecnologias de impressão 3D e FDM na fabricação de moldes rápidos**. 2005. 128p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MACARRÃO JUNIOR, L. **Importância do uso de mock-ups e de técnicas de prototipagem e ferramental rápido no processo de desenvolvimento de produto na indústria automotiva**. 2004. 132p. Trabalho de Curso (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MACARRÃO JUNIOR, L., BRAGA, J. F. G. F., KAMINSKI, P. C. **How to Achieve Faster, Cheaper and High Quality Parts by RVT Silicone Rubber Process**. In: XIV Congresso e Exposição Internacionais da Tecnologia da Mobilidade, São Paulo, Brasil, 22 a 24 de novembro de 2005, p.1-6. SAE Technical Paper Series n. 2005-01-4095., 2005.

MACARRÃO JUNIOR, L.; KAMINSKI, P. C. **Vacuum Bagging: fiber glass parts fabrication with quality**. In: XV Congresso e Exposição Internacionais da Tecnologia da Mobilidade, São Paulo, Brasil, 21 a 23 de novembro de 2006, p.1-6. SAE Technical Paper Series n. 2006-01-2609., 2006.

MAENO, M. **Lesões por Esforços Repetitivos - LER**. Caderno de saúde do trabalhador. São Paulo: Kingraf – gráfica e editora, 2001.

MANUFACTURING CENTER. **Combining technologies yields functional castings.** Disponível em: http://www.manufacturingcenter.com/metlfax/archives/0701/0701rpp.asp. Acesso em: 03 nov. 2007.

MICHAELIS. **Dicionário escolar inglês**. São Paulo: Editora Melhoramentos, 2001.

MOURA, R. A. **Embalagem, unitização e conteinerização**. São Paulo: IMAM, 1997.

NABARRETE, A. **Análise estrutural em veículos automotivos**. São Bernardo do Campo: IECAT, p.127, 2005.

NR 17 - Ergonomia (117.000-7). **Legislação. Normas regulamentadoras**. Disponível em: http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_17.asp.pdf. Acesso em 18 jan. 2008.

OBJET. **Tecnologia do processo de impressão a jato de tinta PolyJet**. Disponível em: http://www.2objet.com. Acesso em: 11 mai. 2007.

OLIVEIRA, J.; H.; S.; A. **Avaliação das mudanças ocorridas no desenvolvimento de produtos devidas à utilização de modelos produzidos por prototipagem rápida**. 2001. 39p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

OPTOMEC. **Laser Engineered Net Shaping**. Disponível em: http://www.optomec.com. Acesso em 13 jun. 2007.

PEREIRA, L. E. C., **Análise por sistemas CAE de pontos de injeção de seção retangular para moldes fabricados em resina termofixa**. 2007. 109p. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

POLYJET. **Tecnologias de prototipagem rápida**. Disponível em: http://www.artis.com.br. Acesso em 13 jun. 2007.

PHAM, D. T.; GAULT, R. S. **A Comparison of Rapid Prototyping technologies**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.38, p.1257-1287, 1998.

PRZYSIEZNY, W. L. **Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho: um enfoque ergonômico**. Santa Catarina: UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de pós-graduação em engenharia de produção e sistemas – Ergonomia, 17p., 2000.

REINFORCED PLASTICS. **Vacuum Bagging: a versatile processing tool**. Special Feature. Elsevier Science Publishers Ltd. p.22-23, 1992.

REIS, M. G. C.; BONESIO, M. C. M.; DUDZIAK, E. A.; TORRE, S. R. S. D. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses / Divisão de biblioteca da Epusp**. –3.ed.—São Paulo, 103p., 2006.

ROBTEC. **Processos de prototipagem rápida – representante da 3D Systems no Brasil**. Disponível em: http://www.robtec.com. Acesso em 13 jun. 2007.

ROBTEC. **Vacuum casting**. Disponível em: http://www.robtec.com/pt/servicosequipamentos/vacuumcastingequipamentos.htm. Acesso em 20 out. 2007.

ROOKS, B. **Rapid Tooling for casting prototypes**. Journal of Assembly Automation, v.22, n.1, p.40-45, 2002.

ROSOCHOWISKI, A., MATUSZAK, A. **Rapid Tooling: state of the art**. Journal of Materials Processing Technology, v.106, p.191-198, 2000.

SERAFIN, C. L.; CAPUDI, E.; GONDAK, M.O.; ARAÚJO, M. S. **Desenvolvimento de um compósito de epoxy e pó de alumínio para usinagem**. In: XVII CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 15 a 19 de Novembro de 2006, p.1-12, 2006.

SILVA, G. C. **Conhecimento e aplicação dos conceitos sobre FMEA para embalagens**. Material elaborado para treinamento dos planejadores do setor de Planejamento de Fluxo de Materiais e Embalagens. Classificação: informativa (não confidencial): São Paulo, p.1-30, 2005.

SILVA, G. C., KAMINSKI, P. C. **Prototipagem rápida aplicada às peças utilizadas em ensaios estáticos de embalagens para acondicionamento e transporte de peças automotivas**. In: XVI Congresso e Exposição Internacionais da Tecnologia da Mobilidade, São Paulo, Brasil, 28 a 30 de novembro de 2007, p.1-9. SAE Technical Paper Series n. 2007-01-2690., 2007.

SILVA, M. C.; VALENTE, C. **Memorial descritivo para contratação de desenvolvimento de embalagens**. Documentação interna da montadora (não confidencial), 2006.

SISGRAPH. **Processos de prototipagem rápida – representante da empresa Stratasys no Brasil**. Disponível em: http://www.sysgraph.com.br. Acesso em jun. 2007.

SORTINO, G. **Ferramentas de suporte a engenharia**. São Bernardo do Campo: IECAT; 83p., 2005.

SOUZA, G. F. M. **PMC 5613 – Confiabilidade de produtos e sistemas**. Apostila do curso de Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. São Paulo, 165p., 2007.

TAVARES, J. M. R. S. **Introdução ao método dos elementos finitos**. Porto, Portugal: FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 103p., 1998.

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

UNINOVA. **Rede nacional de prototipagem rápida**. Disponível em: http://www2.uninova.pt/rnpr/glossary/index.php?form_search_query=K*. Acesso em 20 out. 2007.

UPCRAFT, S.; FLETCHER, R. **The Rapid Prototyping technologies**. Rapid Prototyping Journal, v.23, n. 4, p.318-330., 2003.

VASCONCELOS, P.; LINO, F. J.; NETO, R. J. **O fabrico rápido de ferramentas a serviço da engenharia concorrente**. Instituto Politécnico de Viana do Castelo (ESTG). Viana do Castelo: Portugal, 13p., 2002.

VOLPATO, N.; AHRENS, C. H.; FERREIRA, C. V.; PETRUSH, G.; CARVALHO, J.; SANTOS, J. R. L.; SILVA, J. V. L. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.

YAMAMUTI, C. T.; VALENTE, C. **Memorial descritivo nº. PFME – 249-004**. Documentação interna da montadora (não confidencial), 2004.

WISNER, A. **A inteligência no trabalho: textos selecionados de ergonomia**. 1.ed. São Paulo: Fundacentro, 1997.

ZHOU, J. G., HE, Z. **A new Rapid Tooling technique and its special binder study**. Rapid Prototyping Journal. v.5, n.2, p.82-88, 1999.

APÊNDICE A - CONCEITOS E APLICAÇÃO DOS CONHECIMENTOS DE FMEA PARA EMBALAGENS

FMEA – Para o grupo de embalagens, o que interessa?

Abranger todos os itens pertencentes à embalagem em questão, sem omitir ou desprezar componentes ou processos correlatos, por mais simples que possam parecer.

O planejador é o membro do grupo que possui maior visão de toda a cadeia ou processo que envolve a embalagem, sendo de maior conveniência que este elabore o FMEA, apresentando-o ao time multifuncional e em conjunto com o time pontuar os índices e calcular o número de prioridade de risco (NPR).

Não é impeditivo que algum membro do time multifuncional identifique outras causas de falha, cabendo ao grupo avaliá-la para inclusão ou não no FMEA.

Índices

A figura apresenta os valores para os índices de avaliação utilizados em uma montadora instalada no Brasil.

FMEA DE PROCESSO
Índices de Avaliação

ÍNDICE DE SEVERIDADE

SEVERIDADE	CRITÉRIO: SEVERIDADE DO EFEITO	ÍNDICE
NENHUM	NENHUM EFEITO	1
MUITO MENOR	INTERRUPÇÃO MENOR NA LINHA DE PRODUÇÃO. UMA PARTE (100%) DOS PRODUTOS PODERÁ TER QUE SER RETRABALHADA NA LINHA PORÉM NA ESTAÇÃO DE TRABALHO. ITENS DE ACABAMENTO E ASSENTAMENTO/ REDUÇÃO DE RUÍDO EM NÃO CONFORMIDADE. DEFEITO NOTADO POR DETERMINADOS CLIENTES.	2
MENOR	INTERRUPÇÃO MENOR NA LINHA DE PRODUÇÃO. UMA PARTE (100%) DOS PRODUTOS PODERÁ TER QUE SER RETRABALHADA NA LINHA PORÉM FORA DA ESTAÇÃO DE TRABALHO. ITENS DE ACABAMENTO/ASSENTAMENTO EM NÃO CONFORMIDADE. DEFEITO NOTADO PELA MAIORIA DOS CLIENTES.	3
MUITO BAIXO	INTERRUPÇÃO MENOR DA LINHA DE PRODUÇÃO. OS PRODUTOS PODERÃO TER QUE SER SELECIONADOS E UMA PARTE DELES (MENOS QUE 100%), RETRABALHADA. ITENS DE ACABAMENTO E ASSENTAMENTO/REDUÇÃO DE RUÍDO EM NÃO CONFORMIDADE. DEFEITO OBSERVADO PELA MAIORIA DOS CLIENTES.	4
BAIXO	INTERRUPÇÃO MENOR DA LINHA DE PRODUÇÃO. 100% DOS PRODUTOS PODERÃO TER QUE SER RETRABALHADOS. VEÍCULO/ITEM EM OPERAÇÃO, MAS COM ALGUNS ITENS DE CONFORTO/CONVENIÊNCIA EM NÍVEL DE OPERAÇÃO DEGRADADA. O CLIENTE PASSA POR ALGUMA INSATISFAÇÃO.	5
MODERADO	INTERRUPÇÃO MENOR DA LINHA DE PRODUÇÃO. UMA PARTE DOS PRODUTOS (MENOS QUE 100%) PODERÁ TER QUE SER SUCATEADA (SEM SELEÇÃO). VEÍCULO EM OPERAÇÃO, MAS COM ALGUNS ITENS DE CONFORTO/CONVENIÊNCIA FORA DE OPERAÇÃO. O CLIENTE PASSA POR DESCONFORTO.	6
ELEVADO	INTERRUPÇÃO MENOR DA LINHA DE PRODUÇÃO. OS PRODUTOS PODERÃO SER SELECIONADOS E UMA PARTE DELES (MENOS QUE 100%), SUCATEADA. VEÍCULO EM OPERAÇÃO, MAS COM NÍVEL DEGRADADO DE DESEMPENHO. CLIENTE INSATISFEITO.	7
MUITO ELEVADO	INTERRUPÇÃO MAIOR DA LINHA DE PRODUÇÃO. 100% DOS PRODUTOS PODERÃO TER QUE SER SUCATEADOS. VEÍCULO/ITEM FORA DE OPERAÇÃO, COM PERDA DA FUNÇÃO PRIMÁRIA. CLIENTE MUITO INSATISFEITO.	8
PERIGOSO COM ADVERTÊNCIA	PODE COLOCAR EM PERIGO A MÁQUINA OU O OPERADOR DE MONTAGEM. CLASSIFICAÇÃO DE SEVERIDADE MUITO ELEVADA QUANDO O MODO DE FALHA POTENCIAL AFETA A SEGURANÇA DE OPERAÇÃO DO VEÍCULO E/OU ENVOLVE O NÃO-ATENDIMENTO À REGULAMENTAÇÃO GOVERNAMENTAL, COM ADVERTÊNCIA.	9
PERIGOSO SEM ADVERTÊNCIA	PODE COLOCAR EM PERIGO A MÁQUINA OU O OPERADOR DE MONTAGEM. CLASSIFICAÇÃO DE SEVERIDADE MUITO ELEVADA QUANDO O MODO DE FALHA POTENCIAL AFETA A SEGURANÇA DE OPERAÇÃO DO VEÍCULO E/OU ENVOLVE O NÃO-ATENDIMENTO À REGULAMENTAÇÃO GOVERNAMENTAL. A FALHA OCORRERÁ SEM ADVERTÊNCIA.	10

ÍNDICE DE OCORRÊNCIA

PROBABILIDADE	CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	FALHA	CPK	ÍNDICE
REMOTA	FALHA É INCOMUM. NENHUMA FALHA ASSOCIADA A PROCESSOS QUASE IDÊNTICOS.	≤ 1 em 1500000	≥ 1.67	1
MUITO BAIXA	SOMENTE FALHAS ISOLADAS ASSOCIADAS A PROCESSOS QUASE IDÊNTICOS.	1 em 150000	≥ 1.50	2
BAIXA	FALHAS ISOLADAS ASSOCIADAS A PROCESSOS SIMILARES.	1 em 15000	≥ 1.33	3
MODERADA	GERALMENTE ASSOCIADA A PROCESSOS SIMILARES A OUTROS ANTERIORES QUE TENHAM EXPERIMENTADO FALHAS OCASIONAIS, PORÉM NÃO EM PROPORÇÕES MAIORES.	1 em 2000	≥ 1.17	4
		1 em 400	≥ 1.00	5
		1 em 80	≥ 0.83	6
ELEVADA	GERALMENTE ASSOCIADA A PROCESSOS SIMILARES A OUTROS ANTERIORES QUE TENHAM FALHADO COM FREQUÊNCIA.	1 em 20	≥ 0.67	7
		1 em 8	≥ 0.51	8
MUITO ELEVADA	A FALHA É QUASE INEVITÁVEL.	1 em 3	≥ 0.33	9
		≥ 1 em 2	< 0.33	10

ÍNDICE DE DETECÇÃO

DETECÇÃO	EXPECTATIVA DE DETECÇÃO PELO CONTROLE EXISTENTE	ÍNDICE
QUASE CERTAMENTE	CONTROLE EXISTENTE QUASE QUE CERTAMENTE VIRÁ A DETECTAR O MODO DE FALHA. CONTROLE DE DETECÇÃO CONFIÁVEIS SÃO CONHECIDOS PARA PROCESSOS SIMILARES.	1
MUITO ELEVADA	CHANCE MUITO ELEVADA DE QUE O CONTROLE EXISTENTE VENHA A DETECTAR O MODO DE FALHA.	2
ELEVADA	CHANCE ELEVADA DE QUE O CONTROLE EXISTENTE VENHA A DETECTAR O MODO DE FALHA.	3
MODERADAMENTE ALTA	CHANCE MODERADAMENTE ALTA DE QUE O CONTROLE EXISTENTE VENHA A DETECTAR O MODO DE FALHA.	4
MODERADA	CHANCE MODERADA DE QUE O CONTROLE EXISTENTE VENHA A DETECTAR O MODO DE FALHA.	5
BAIXA	CHANCE BAIXA DE QUE O CONTROLE EXISTENTE VENHA A DETECTAR CAUSA/MECANISMO E MODO DE FALHA.	6
MUITO BAIXA	CHANCE MUITO BAIXA DE QUE O CONTROLE EXISTENTE VENHA A DETECTAR CAUSA/MECANISMO DE FALHA SUBSEQÜENTE.	7
REMOTA	CHANCE REMOTA DE QUE O CONTROLE EXISTENTE VENHA A DETECTAR CAUSA/MECANISMO E MODO DE FALHA SUBSEQÜENTE.	8
MUITO REMOTA	CHANCE MUITO REMOTA DE QUE O CONTROLE EXISTENTE VENHA A DETECTAR CAUSA/MECANISMO E MODO DE FALHA SUBSEQÜENTE.	9
QUASE IMPOSSÍVEL	NENHUM CONTROLE CONHECIDO DISPONÍVEL PARA DETECTAR A FALHA.	10

Figura 1 Índices de avaliação conforme tabela da montadora

Exemplo de um FMEA para embalagem

As figuras 2, 3, 4 e 5 apresentam um exemplo de aplicação de FMEA na etapa de desenvolvimento de uma determinada embalagem.

FMEA de PROCESSO			
ANÁLISE do MODO e dos EFEITOS de FALHAS em POTENCIAL			
Nome do FMEA FMEA para Embalagem de acondicionamento e Transporte da Tampa Dianteira Externa			
Nome e Número da Peça/ Conjunto/ Processo Tampa Dianteira Externa 5Z0.823.105		**Programa** Fox Eu LHD BUC	
Setor Emitente Planejamento de Fluxo Materiais e Embalagens	**Eng. Responsável** Guilherme Canuto	**Plantas/ fornecedores atingidos** Anchieta / Curitiba	**Cliente** Produção Ancheita
Time FMEA emitente Rev 00 — **Nome** Pedro Adão	**Departamento/ Ramal** Produção	**Data Emissão - Rev 00** 5/9/2005	**Comentários** ****
Time FMEA emitente Rev 00 — **Nome** João Melão	**Departamento/ Ramal** Qualidade	**Data Emissão - Rev 00** 5/9/2005	**Comentários** ****
Time FMEA emitente Rev 00 — **Nome** ****	**Departamento/ Ramal** ****	**Data Emissão - Rev 00** ****	**Comentários** ****
Time FMEA emitente Rev 00 — **Nome** ****	**Departamento/ Ramal** ****	**Data Emissão - Rev 00** ****	**Comentários** ****
Time FMEA emitente Rev — **Nome** ****	**Departamento/ Ramal** ****	**Data Retroalimentação - Rev** 12/2/2006	**Histórico** Conforme análise Técnica de 05/09/05.
Nome e Número da Peça/ Conjunto/ Processo	Embalagem para Tampa Dianteira Externa 5Z0.823.105		

Figura 2 Cabeçalho do formulário

Nome e Número da Peça/ Conjunto/ Processo Tampa Dianteira Externa 5Z0.823.105

Função do processo/ produto	Modo / Tipo de falha potencial	Efeito potencial da falha	Classificação	Causa potencial / mecanismos de falha	Controles atuais no processo	Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR	Ação recomendada / nome do responsável / data prevista	Previsto			Ações tomadas/ data efetiva	Real		
											Ocorrência	Detecção	NPR		Ocorrência	Detecção	NPR
Estrutura da embalagem.	Não suportar esforços de trabalho (movimento. / empilhamento.)	Acidente com operadores envolvidos no processo.	D	Dimensionamento Incorreto da estrutura.	Teste de transporte / Try-Out.	9	2	4	72	Solicitar análise estrutural e memorial de cálculo ao fornecedor. Resp: Guilherme Canuto - prazo: 10/12/05	1	3	27				
	Cisalhamento de soldas.	Acidente com operadores envolvidos no processo.	D	Deposição de escória dentro do cordão de solda durante o processo de soldagem.	Não tem	9	2	4	72	Executar ensaios e tração / cisalhamento / verificar análise metalográfica, solicitar Laudo técnico e ART. Resp: Guilherme Canuto - prazo: 10/12/05	1	3	27				
Separadores das peças.	Passo irregular	Amassamento das peças.	*	Defeito construtivo.	Check List	7	3	2	42	Fornecedor deverá apresentar amostras confeccionadas pelo molde definitivo para validação. Utilização da amostra aprovada como padrão de controle Resp: Firma responsável pelo pedido - prazo: 10/12/05	2	1	14				
	Forma	Amassamento das peças.	*	Defeito construtivo.	Check List	7	3	2	42	Fornecedor deve inspecionar 100% dos separadores e garantir repetibilidade conforme amostra aprovada. Resp: Firma responsável pelo pedido - prazo: 10/12/05	3	1	21				
	Folga entre separadores.	Queda das peças durante o transporte.	*	Defeito construtivo.	Teste de transporte / Try-Out.	7	3	3	63	Assegurar teste de 100% das embalagens do lote a ser entregue com peças.Resp: Firma responsável pelo pedido - prazo: 10/12/05	3	2	42				
	Fixação	Queda das peças durante o transporte.	*	Defeito construtivo.	Check List	7	3	3	63	Inspecionar montagem dos separadores na embalagem, Apresentar plano de controle.Resp: Firma responsável pelo pedido - prazo: 10/12/05	3	2	42				
Grafismo	Identificação Incorreta da embalagem.	Uso inadequado da embalagem.		Erro durante o processo de fabricação da embalagem.	Check List	2	1	3	6	Controle e inspeção do lote fabricado antes da entrega. Resp: Firma responsável pelo pedido - prazo: 10/12/05	1	2	4				
Pintura	Fora de padrão especificado.	Dificuldade de identificação da embalagem.		Uso de tinta fora de especificação.	Check List	2	1	3	6	Controle e inspeção do lote fabricado antes da entrega. Resp: Firma responsável pelo pedido - prazo: 10/12/05	1	2	4				

Figura 3 Campo para inserção das informações

Nome e Número da Peça/ Conjunto/ Processo	Tampa Dianteira Externa	5Z0.823.105															
Função do processo/ produto	Modo / Tipo de falha potencial	Efeito potencial da falha	Classificação	Causa potencial / mecanismos de falha	Controles atuais no processo	Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR	Ação recomendada / nome do responsável / data prevista	Previsto			Ações tomadas/ data efetiva	Real		
											Ocorrência	Detecção	NPR		Ocorrência	Detecção	NPR
Pintura	Não-homogênea	Dificuldade de identificação da embalagem.		Problemas no processo de pintura do fornecedor.	Check List	2	1	3	6	Prever meio de controle no processo de Pintura / Inspecionar periodicamente a composição da tinta. Resp: Firma responsável pelo pedido - prazo: 10/12/05	1	2	4				
Guia de Empilhamento	Falta	Acidente com operadores envolvidos no processo.	D	Falha no processo de fabricação do fornecedor.	Check List	9	2	4	72	Prever método de inspeção em 100% das embalagens fabricadas antes de entregar o lote. Resp: Firma responsável pelo pedido - prazo: 10/12/05	2	3	54				
Porta Etiquetas	Falta	Impossibilidade de atachar a etiqueta de identificação na embalagem.		Falha no processo de fabricação do fornecedor.	Check List	2	2	2	8	Prever método de inspeção em 100% das embalagens fabricadas antes de entregar o lote. Resp: Firma responsável pelo pedido - prazo: 10/12/05	2	1	4				
Porta Etiquetas	Defeito	Impossibilidade de atachar a etiqueta de identificação na embalagem.		Danificado durante a montagem ou no transporte.	Check List	2	2	2	8	Solicitar ao fornecedor plano de controle do processo de fabricação. Resp: Firma responsável pelo pedido - prazo: 10/12/05	1	2	4				
Guias para Garfo de Empilhamento (Skid).	Fora de Especificação Dimensional (menores).	Impossibilidade de movimentar a embalagem.	*	Falha no processo de fabricação do fornecedor.	Teste de transporte / Try-Out.	5	3	3	45	Confecção de gabaritos para fabricação.	2	3	30				
Face de acondicionamento da Peça desfavorável ao abastecimento.	Dificuldade de abastecer a embalagem.	Condição ergonomica desfavorável do operador.		Falha no projeto da embalagem.	Try-Out da embalagem	6	3	1	18	Consenso / definição entre áreas produtivas (Estamparia/Armação) envolvidas antes do desenvolvimento do protótipo. Resp: Guilherme Canuto - prazo: 01/12/05	1	1	6				
Face de acondicionamento da Peça desfavorável para retirada das peças.	Dificuldade de descarregar a embalagem.	Condição ergonomica desfavorável do operador.		Falha no projeto da embalagem.	Try-Out da embalagem	6	3	1	18	Consenso / definição entre áreas produtivas (Estamparia/Armação) envolvidas antes do desenvolvimento do protótipo.Resp: Guilherme Canuto - prazo: 01/12/05	1	1	6				
Posição de acondicionamento da peça na embalagem.	Posição ergonomica desfavorável	Lesão do operador.	D	Falha no projeto da embalagem.	Try-Out da embalagem	9	3	1	27	Aprovação do Projeto ou Protótipo pela Medicina Ocupacional. Resp: Guilherme Canuto - prazo: 01/12/05	1	1	9				

Figura 4 Continuação do formulário

Nome e Número da Peça/ Conjunto/ Processo	Tampa Dianteira Externa	5Z0.823.105															
Função do processo/ produto	Modo / Tipo de falha potencial	Efeito potencial da falha	Classificação	Causa potencial / mecanismos de falha	Controles atuais no processo	Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR	Ação recomendada / nome do responsável / data prevista	Previsto			Ações tomadas/ data efetiva	Real		
											Ocorrência	Detecção	NPR		Ocorrência	Detecção	NPR
Código do Sistema Lison	Falta	Perda de Rastreabilidade das embalagens no circulante interno e externo às Plantas.		Falha no processo de fabricação do fornecedor.	Try Out / Check List	2	3	3	18	Fornecer padrão de grafismo ao fornecedor / Certificar-se que o gabarito do mesmo contemple todas as informações do padrão fornecido. Resp: Guilherme canuto - prazo: 15/12/05	2	1	4				
Pinos de travamento (Canhão)	Falta galvanização	Oxidação / Perda da função de travamento.	*	Falha no processo de galvanização / fabricação do fornecedor	Try out / Check List	4	2	3	24	Solicitar amostra ao fornecedor, aprovar amostra e adotar amostra aprovada como padrão de controle.	2	2	16				
	Mola sem ação	Não garante travamento das peças	*	Falha no processo de fabricação do fornecedor	Try Out / Teste de Transporte / Check List	5	2	3	30	Solicitar amostra ao fornecedor, aprovar amostra e adotar amostra aprovada como padrão de controle.	2	2	20				
Braços Articulados	Excesso de Folga	Queda das Peças	*	Falha no processo de fabricação do fornecedor	Try Out / Teste de Transporte / Check List	9	3	2	54	Criar gabarito para fabricação / Testar 100% do lote fabricado com peças.	2	1	18				

Figura 5 Final do formulário

FMEA – Fechamento e disponibilização

Depois de constatado a eficácia das ações sugeridas (NPR previsto), um novo cálculo é feito (NPR real) baseado nas evidências e documentos que possam comprovar que as ações implementadas atingiram os resultados esperados.

O próximo passo é disponibilizar o FMEA ao cliente (usuário final) juntamente com a documentação inerente ao processo (documentação *as built*, laudo técnico, anotação de responsabilidade técnica – ART, folha de instrução da embalagem, etc.).

Retro-alimentação do FMEA

A retro-alimentação do FMEA é feita pelo departamento responsável pelo uso do equipamento. Em alguns casos os departamentos envolvidos com o processo possuem autonomia para alterar ou modificar o método ou equipamento entregue.

Para o grupo de embalagens isto não se aplica, uma vez que os clientes finais (produção e logística) não realizam alterações ou modificações significativas nas embalagens entregues. Esta atividade é de responsabilidade do departamento de Planejamento de Fluxo de Materiais e Embalagens (PFME).

APÊNDICE B - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

A RP é uma ferramenta de auxílio ao PDP (Processo de Desenvolvimento do Produto). Independente da tecnologia escolhida, todas obedecem a um ciclo de produção que se inicia com o projeto virtual em sistemas de CAD e se finaliza na obtenção do protótipo físico.

Basicamente, pode-se dizer que a RP obedece as seguintes fases de desenvolvimento.

- Criação de um modelo do produto em um sistema CAD 3D;
- Transformação deste modelo em um arquivo no formato específico dos sistemas de RP;
- A discretização do arquivo em uma malha composta por elementos triangulares com coordenadas X,Y,Z e vetores normais de superfície;
- Fatiamento do modelo discretizado em camadas;
- Envio das informações de cada camada para o equipamento de RP;
- Construção física da camada.

Desta seqüência de etapas, pode-se observar que o instante mais importante do processo está na transformação do modelo gerado em CAD para um arquivo de formato específico dos sistemas de RP, pois é a partir deste arquivo, que o equipamento de RP irá construir o produto final.

Existem vários tipos de sistemas de CAD, cada um com diferentes estruturas de troca de dados. Isto provoca um problema entre as fontes desenvolvedoras do produto e as fontes que irão construí-lo, pois nem sempre ambos trabalham com o mesmo sistema de CAD.

De acordo com Henriques (2003) vários métodos para troca de dados foram desenvolvidos ao longo das últimas três décadas.

Estes sistemas podem ser classificados em três grupos descritos a seguir.

- Sistema único;
- Conversores diretos;
- Padrões neutros.

Sistema único

O sistema único propõe que todos os setores envolvidos no PDP utilizem o mesmo sistema CAD e versão, desta forma, todos os envolvidos trabalham com um único formato nativo, com 100% de compatibilidade, reduzindo custos e tempo com retrabalhos.

Vantagens do sistema único

Henriques (2003) descreve algumas vantagens deste sistema.

- Utilização total das potencialidades e funcionalidades do sistema CAD;
- Eliminação de custos e tempo com retrabalhos de arquivos;
- 100% de compatibilidade.

Desvantagens do sistema único

Henriques (2003) também identifica algumas desvantagens do sistema único.

- Os usuários precisam ter vários softwares e hardwares específicos para trabalhar com outros usuários que não possuam o mesmo sistema de CAD;
- Elevados custos de aquisição de softwares e hardwares;
- Treinamento de pessoal e duplicação de dados para atender a demanda de cada seguimento.

Conversores diretos

Uma outra forma de resolver o problema de troca de dados reconhecendo a existência de múltiplos sistemas de CAD é a construção de tradutores para troca de informação entre estes múltiplos sistemas.

De acordo com Henriques (2003), os tradutores diretos convertem os dados de um sistema CAD A qualquer para o formato de dados de outro sistema CAD B qualquer.

Vantagens dos conversores diretos

Como vantagens deste sistema Henriques (2003) descreve.

- Minimização da deficiência na troca de dados entre dois sistemas;
- Conversão de grande volume de dados.

Desvantagens dos conversores diretos

Henriques (2003) também identifica algumas desvantagens.

- Elevado número de tradutores para mais de três sistemas;
- Alto custo de desenvolvimento do tradutor;
- Múltiplas versões de tradutores, o que inviabiliza sua aplicação em grandes projetos.

Padrões neutros

Neste tipo de sistema as informações gráficas são traduzidas do formato interno de um determinado sistema para um formato neutro padrão, aberto e conhecido de todos os sistemas (HENRIQUES, 2003).

O formato neutro pode conter todos os dados necessários para suportar o desenvolvimento do produto, além de precisar de dois tradutores apenas para cada sistema. No caso da necessidade de mudança de um sistema, o impacto incide apenas sobre dois tradutores.

Entre a década de 1980 e 1990 os padrões neutros de troca de dados foram amplamente estudados e implementados, com destaque ao *Initial Graphic Exchange Specification* (IGES), ao *Verband der Automobilindustrie – Flächen Schnittstelle* (VDA – FS) e ao *Standard d'Exchange et de Transfert* (SET).

A figura 4.8 ilustra o estado da arte da troca de dados entre os sistemas CAD entre estas décadas.

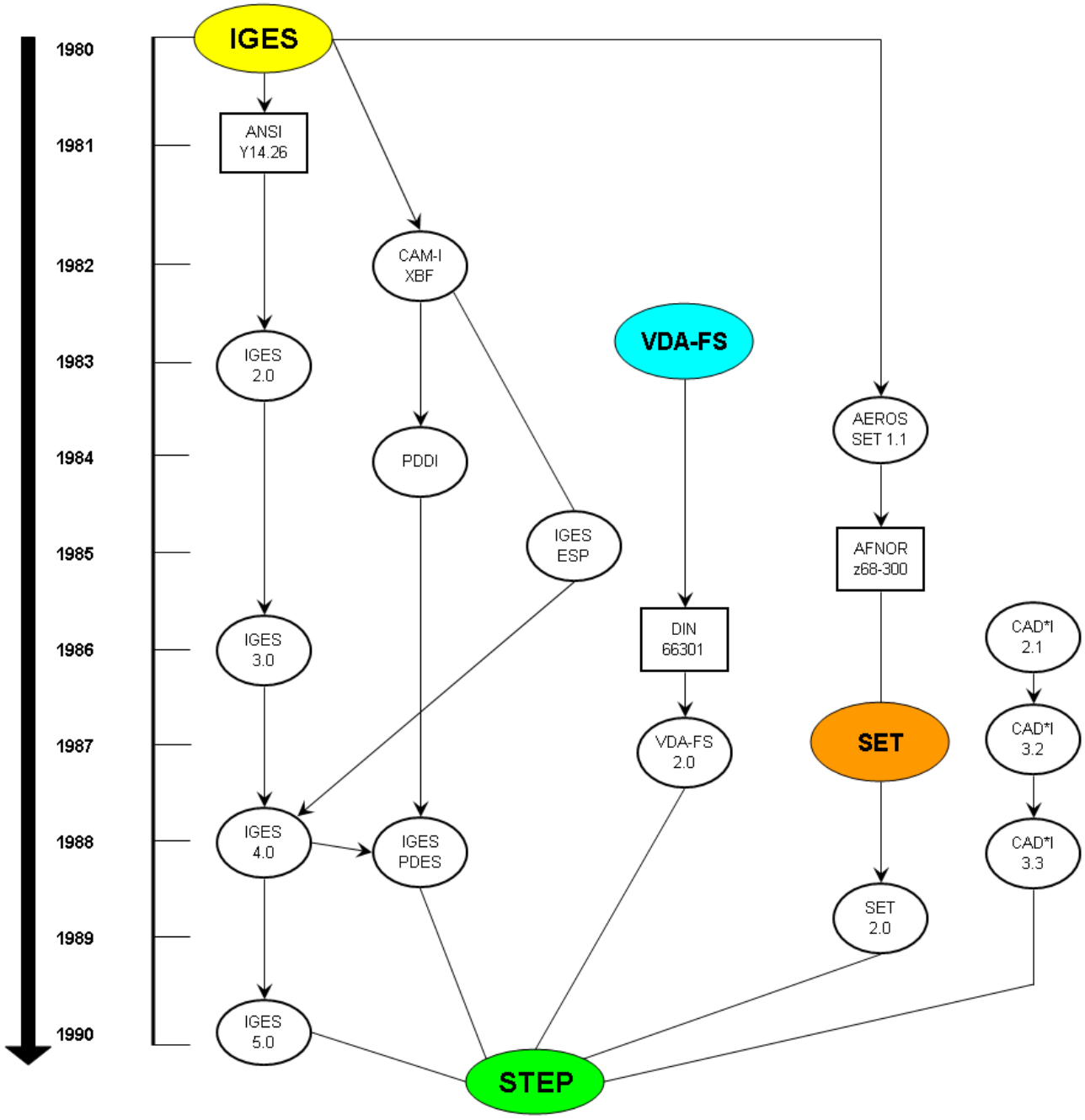


Figura 1 Cronologia da troca de dados (MCMAHON; BROWNE, 1998 apud HENRIQUES, 2003)

Formato IGES

De acordo com Macmahon e Browne (1998) apud Henriques (2003) a IGES foi desenvolvida pelos principais maiores desenvolvedores de sistemas CAD dos EUA, influenciada pelo CAD e pela tecnologia de armazenamento de dados, inicialmente baseados no *Boeing Database Standard Format* (DBSF).

Segundo Henriques (2003) o primeiro esboço da IGES foi apresentado em janeiro de 1980. Continha a geometria, os dados gráficos e anotações.

No início, a IGES foi desenvolvida com a finalidade de ser uma especificação, porém, em 1980 ela foi submetida ao comitê do ANSI Y14.263 para a padronização.

A IGES foi à primeira solução funcional para troca de dados entre sistemas de CAD. Embora utilizado até os dias de hoje, o formato IGES apresenta diversas deficiências desde a sua criação, apresentadas a seguir.

- Segundo Macmahon e Browne (1998) apud Henriques (2003) o arquivo no formato IGES é substancialmente maior que o arquivo originado em CAD;
- De acordo com Brandarkar (2000) apud Henriques (2003) o formato do arquivo é de difícil compreensão devido à forma com que os dados estão organizados;
- Barra (1995) apud Henriques (2003) identifica problemas de inconsistência;
- De acordo com Holland (1998) apud Henriques (2003) o formato IGES não suporta informações referentes ao *product life cycle* (PLM) - ciclo de vida do produto (PLM);
- Ainda segundo Barra (1995) apud Henriques (2003) este formato não possui nenhum tipo de mecanismo que possa testar o processador ou resolver erros entre dois processadores.

Formato SET

Segundo Rembold, Nnaji e Storr (1994) apud Henriques (2003) a SET teve sua primeira publicação em 1984, tornando-se uma norma nacional francesa.

O formato SET foi desenvolvido com o propósito de tornar o processamento mais eficiente e consistente em relação ao formato IGES.

As informações básicas transmitidas pela SET são modelos em *wireframe*, superfícies, sólidos, MEF, desenhos técnicos e textos para descrição física da estrutura do modelo.

De acordo com Goldstein, Kemmerer e Parks (1998) e Kemmerer (1999) apud Henriques (2003) a versão 1.1 da SET contribuiu para o futuro desenvolvimento do formato STEP uma vez que este formato já continha:

- especificações detalhadas para a área mecânica;
- informações adicionais sobre a estrutura de dados;
- regras e recomendações para futuros desenvolvimentos.

Formato VDA-FS

De acordo com Kemmerer (1999) apud Henriques (2003) a VDA-FS teve o seu desenvolvimento na indústria automotiva alemã no início dos anos 80, para troca de dados geométricos de curvas e superfícies complexas.

Uma vantagem característica da VDA-FS é a forma simples de escrita dos dados no arquivo físico, o que impacta na melhora do desenvolvimento dos processadores.

Mesmo com o avanço na troca de dados complexos pela VDA-FS, este formato apresentou deficiências como: dimensões, hachuras, transferência de textos, e outros.

Formato STEP

De acordo com Anderl e Trippner (2000) e Owen (1997) apud Henriques (2003) a STEP é um conjunto de normas que suporta o desenvolvimento do produto de forma a manter as informações integradas e consistentes durante todo PLM.

Segundo Henriques (2003) existem várias nações participando do desenvolvimento da STEP, entre elas destacam-se: a PROSTEP AG e ProSTEP iViP da Alemanha, a PDES, inc dos EUA, a GOSET da França e a JSTEP do Japão.

Formatos de arquivos para RP

Devido à complexidade e problemas dos formatos anteriormente descritos, buscou-se desenvolver formatos capazes de representar a geometria de um produto para aplicações de RP de uma forma mais simples e segura (VOLPATO et al, 2007).

De acordo com Kai, Jacob e Mei (1997) o formato de arquivo STL foi desenvolvido pela empresa 3D Systems e publicado em 1987.

Formato STL

O formato STL é pioneiro no seguimento de RP. Caracterizado pela forma simples e robusta de representar modelos tridimensionais através de uma malha discretizada de elementos triangulares, este formato é hoje considerado um padrão na indústria de RP e difundido em quase, senão todos os sistemas de CAD (BYUN; LEE, 2006).

De acordo com Volpato et al (2007), o arquivo STL guarda uma representação numérica em ponto flutuante das coordenadas cartesianas X,Y,Z nos vértices de cada elemento triangular.

De acordo com a regra da mão direita, um vetor unitário é associado a estes vértices definindo o sentido da face externa da superfície a ser construída. Esta concepção permite que qualquer sistema de RP interprete as informações do arquivo em formato STL, independente dos recursos computacionais disponíveis (VOLPATO, et al, 2007).

A figura 4.9 representa de forma básica a estrutura deste formato.

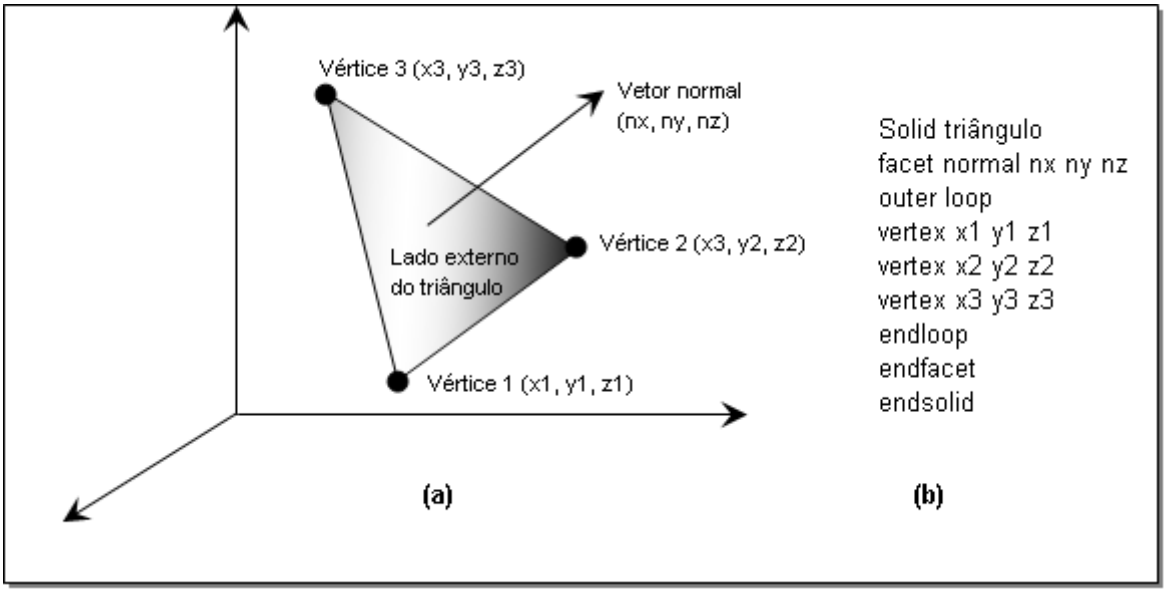


Figura 2 a) Triângulo no formato STL. b) Sintaxe do arquivo STL (ASCII) para o triângulo (VOLPATO et al, 2007)

Devido à grande quantidade de sistemas e recursos operacionais existentes na RP, a interoperabilidade do formato STL torna-se muito útil, podendo ser portada em qualquer sistema operacional (VOLPATO et al, 2007).

Porém, o formato STL também não é perfeito. Problemas de conectividade e consistência da malha estão intrínsecos em sua estrutura.

Segundo Volpato et al (2007) a redundância de dados na formulação do formato STL também é um problema. Quanto maior forem os pontos de vértices, maior será a redundância e, portanto, o tamanho do arquivo STL.

A figura 4.10 demonstra o efeito da redundância entre facetas triangulares de um arquivo qualquer no formato STL.

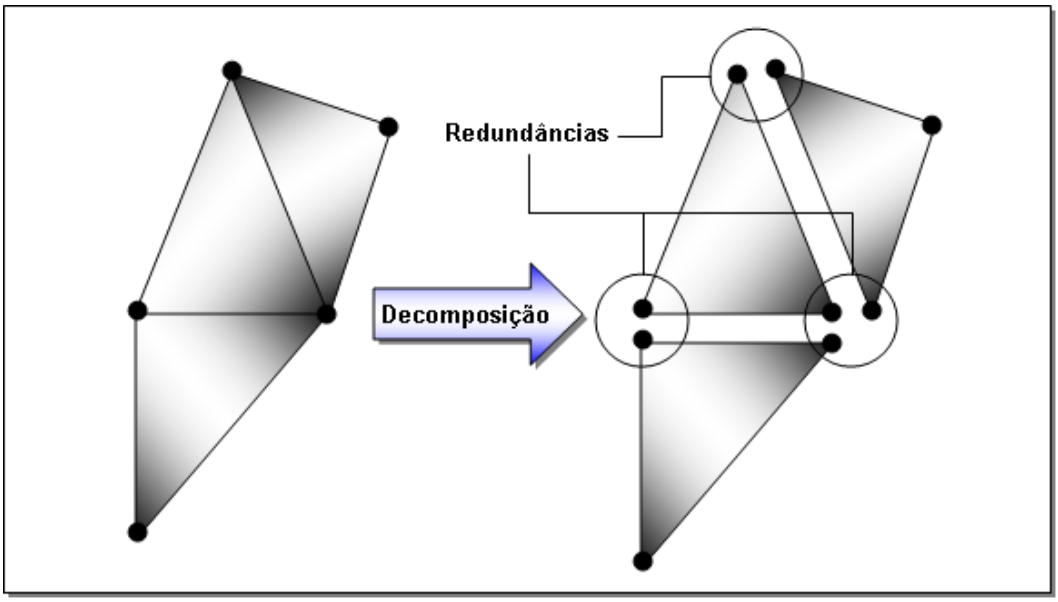


Figura 3 Redundâncias de vértices no formato de arquivo STL (VOLPATO et al, 2007)

Outros problemas do formato STL também são identificados por Volpato et al (2007).

- Malha com falhas ou buracos por falta de triângulos;
- Degeneração topológica;
- Degeneração geométrica;
- Arestas irregulares;
- Inserção de triângulos uns sobre os outros;
- Sobreposição de superfícies;
- Inversão dos vetores normais;
- Sólidos não conectados;
- Superfícies não conectadas;
- Faceamento excessivo.

Detalhes específicos sobre os problemas do formato STL podem ser encontrados no trabalho de Volpato et al (2007).

Formato SLC

De acordo com Kai, Jacob e Mei (1997) O formato *Stereolithography Contour* (SLC) é uma representação 2,5 D dos contornos de um modelo de CAD. Desenvolvido pela empresa 3D Systems, este formato consiste em sucessivas secções transversais em intervalos ascendentes na direção z no qual o material sólido é representado pelos limites interior e exterior da *polyline* (seqüência contínua de segmentos de retas).

Os dados SLC podem ser gerados por várias fontes, ou pela conversão de sólidos 3D ou superfícies em CAD, ou de forma mais direta através de sistemas que produzem dados arranjados em camadas, como os CT-scanners utilizados em tomografia computadorizada no campo medicinal.

Existem várias entidades utilizadas no formato SLC. Elas podem ser segmentos, polylines, limites e contorno de camada, de acordo com a descrição a seguir.

- Segmentos são semi-retas diretamente conectadas em dois vértices x e y.
- Polylines são retas ordenadas em listas dos vértices x e y pontualmente e continuamente conectadas por cada segmento de reta sucessivo.
- Limites são polylines fechadas representando a parte sólida interna e externa do material.
- Contorno de camada é uma lista das partes sólidas internas e externas representando o material especificamente na secção transversal z do modelo CAD.

A secção de leitura são caracteres do tipo ASCII contendo informações globais sobre a peça e de que forma ela é preparada. Em uma outra secção, são reservados 256 bytes para uso futuro.

A relação a seguir descreve a relação das espessuras de camadas do produto. Pode haver até 256 entidades. Cada entrada descreve o início em z, a espessura da camada, e que compensação de largura de linha é desejada para que se confirme à faixa desejada.

- Confirmação do tamanho da tabela 1 byte.
- Confirmação das entradas na tabela 16 bytes.
- Nível z mínimo 4 bytes.
- Espessura de camada 4 bytes.
- Compensação de linha 4 bytes.
- Reserva 4 bytes.

A primeira confirmação de entrada na tabela é o valor de início z devido ao contorno de camada. Se a secção transversal produzir uma espessura singular de 0.1524 mm e no primeiro nível z da peça de 10.16 mm a compensação de linha com valor desejado será de 0,127 mm. A confirmação da tabela segue da seguinte forma:

- confirmação do tamanho da tabela 1
- confirmação das entradas da tabela 10.16 0.1524 0.127 0.0

Os dados de contorno da secção são séries sucessivas das secções transversais ascendentes em z ou camadas acompanhando os dados de contorno.

Cada contorno de camada contém um valor mínimo de z (*z-layer*), e um número de limites seguidos pela relação dos dados de limites individuais.

Os dados de limite contêm um número de vértices x e y para cada limite, um número de folga, e finalmente uma relação dos pontos e bytes dos pontos dos vértices. A localização das folgas pode ser determinada quando os pontos dos vértices se repetem entre si.

O contorno da camada é empilhado em ordem ascendente na direção da parte superior da peça. A última camada ou a parte superior da peça é indicada pelo nível z e a terminação não assinada é do tipo integer (0 x FFFFFFFF).

O formato SLC é uma representação simples do objeto sólido. Este formato é aceito diretamente pelos sistemas 3D de RP e em alguns casos não precisa necessariamente ser fatiado. Porém, o formato SLC pode representar objetos sólidos somente de forma aproximada.

Formato CLI

Segundo Kai, Jacob e Mei (1997) o *Common Layer Interface* (CLI) foi desenvolvido na *Brite Eurean Project* como suporte dos maiores fabricantes de carros.

De acordo com Volpato et al (2007) o desenvolvimento deste formato teve como proposta a independência de se ter um fornecedor específico, como o formato SLC da 3D Systems.

Neste formato, o modelo é construído por uma sucessão de descrições de camadas, onde cada camada é representada por um conjunto de *polylines* no sentido horário, definindo os contornos externos que não podem intersectar outro contorno ou ele próprio.

O entendimento deste formato é bastante simples, eficiente e sem ambigüidade de formatos para inserção de dados para todos os sistemas baseados em representação 2D de camadas (KAI; JACOB; MEI, 1997).

Ainda segundo Volpato et al (2007), este formato pode ser representado em ASCII e binário, o que facilita a manipulação no caso de edição ou correção de erros.

A principal desvantagem citada por Volpato et al (2007) é o fato de que o contorno é obtido por segmentos de reta, ou seja, por uma aproximação de curvas. O eixo de construção é definido como sendo o eixo Z positivo e, conseqüentemente, as camadas são construídas em paralelo ao plano XY.

Formato LEAF

De acordo com Kai, Jacob e Mei (2007) o formato *Layer Exchange* ASCII (LEAF) – foi gerado pela *Helsinki University of Technology*.

O LEAF descreve um arquivo estruturado segundo o paradigma de orientação-a-objetos. Classes de objetos são organizadas em estruturas do tipo árvore de acordo com suas respectivas propriedades e mecanismos de herança. As camadas são compostas por *polylines* 2D (VOLATO et al, 2007). A figura 4.13 ilustra a estrutura deste formato.

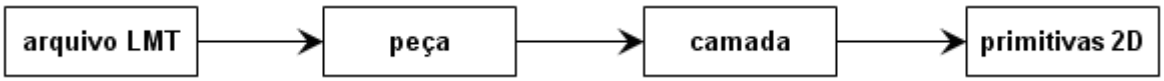


Figura 4 Árvore de classificação do objeto (KAI; JACOB; MEI; 1997 – adaptado pelo autor)

As principais desvantagens do LEAF estão no desenvolvimento de um interpretador para os sistemas de RP. Neste caso, a representação é bem mais complicada que no formato STL e, o formato STL não pode ser interpretado pelo LEAF (VOLPATO et al, 2007).

Segundo Kai, Jacob e Mei (1997) o formato LEAF é humanamente legível e sem representações ambíguas. É também independente dos processos de CAD e RP. Além disso, a divisão de modelos pode ser representada quase que diretamente em LEAF, e os suportes estruturais podem ser facilmente separados da peça original.

Porém, a estrutura do formato LEAF é complicada. É necessária uma interface especial para a transferência de dados para os sistemas de RP.

Formato HP/GL

Segundo Kai, Jacob e Mei (1997) o formato *Hewllet-Packard Graphics Language* (HP/GL) da *Hewllet-Packard* é um formato padrão de dados para impressão gráfica. Todos os tipos de dados são em 2D, incluindo linhas, círculos, tracejados e textos.

O formato HP/GL pode ser utilizado de forma automatizada à rotina de fatiamento que gera a camada de secção transversal do modelo, bem como a rotina de impressão que gera o arquivo de saída.

Um das vantagens de se utilizar o formato HP/GL é que vários sistemas comerciais de CAD possuem interface de saída deste formato. Outra vantagem é que o formato pode ser transferido diretamente para os sistemas de RP sem o fatiamento do modelo.

A desvantagem é que são necessários vários arquivos pequenos para representar o objeto sólido. Assim como no formato IGES, é necessária a criação de um suporte em CAD antes do arquivo ser convertido para o formato HP/GL.

Formato RPI

O formato *Rapid Prototyping Interface* (RPI) foi projetado pela *Rensselaer Design Research Centre, Rensselaer Polytechnic Institute*. Pode ter sido derivada do atual formato STL.

O formato RPI é capaz de representar o modelo facetado, pela adição de informações topológicas em cada faceta ao invés de especificar somente o vértice de coordenadas. Por esta razão, novos tipos de entidades como extremidades e faces do objeto podem ser definidas.

O formato RPI é composto de uma coleção de entidades, onde cada uma define internamente o conteúdo de seus dados. Cada entidade contém duas partes, a parte da sintaxe e a parte de dados correspondentemente.

A definição da entidade é composta pela definição do nome da entidade, por um contador de registros e por um esquema de símbolos de terminação. Todos os dados são lidos, registrados e os campos são compostos, cada um deles correspondendo a uma definição de sintaxe.

Um dos benefícios do formato RPI é a flexibilidade e extensibilidade. No entanto, correção de erros para adequação da superfície do sólido não podem ser reconhecidos pelo formato RPI (KAI; JACOB; MEI, 1997).

APÊNDICE C - OUTROS PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Manufatura laminar de objetos (LOM) da Cubic Technology

A *Laminated Object Manufacturing* (LOM) – Manufatura laminar de objetos (LOM) freqüentemente descrita como "virando o papel" embora outros materiais além de papel estejam disponíveis para esta técnica, é freqüentemente utilizada para se analisar padrões de superfície para tomadas de decisão.

Estes padrões são razoavelmente duráveis e às vezes reutilizáveis. A LOM é uma das mais baratas entre as tecnologias de RP e excelente para fabricação de peças grandes e de complexidade geométrica moderada (UPCRAFT; FLETCHER, 2003).

Método da LOM da Cubic Technology

"A tecnologia LOM se baseia na deposição sucessiva de folhas de materiais contendo adesivo em um dos lados para construir a peça camada por camada" (VOLPATO et al, 2007).

O processo se inicia com a deposição de uma folha do material. Após sua deposição, outra folha e adicionada. Um rolo aquecido passa sobre a superfície da folha superior ativando o adesivo desta que está em contato com a face superior da folha abaixo, unindo os materiais.

Para se obter a geometria do produto, um feixe de laser CO_2 de 25 ou 50W é direcionado por um conjunto de espelhos controlados por um sistema de deslocamento X-Y que define o contorno do produto nesta camada. Além desta função, o feixe laser também fragiliza as regiões não pertencentes ao produto em pequenos triângulos, para que possam ser removidos do produto ao final do processo (VOLPATO et al, 2007).

De forma análoga aos outros processos de RP, uma plataforma que se desloca no sentido vertical (em z) possibilita a adição subseqüente de material para composição do produto. A figura 1 mostra o princípio de funcionamento deste processo.

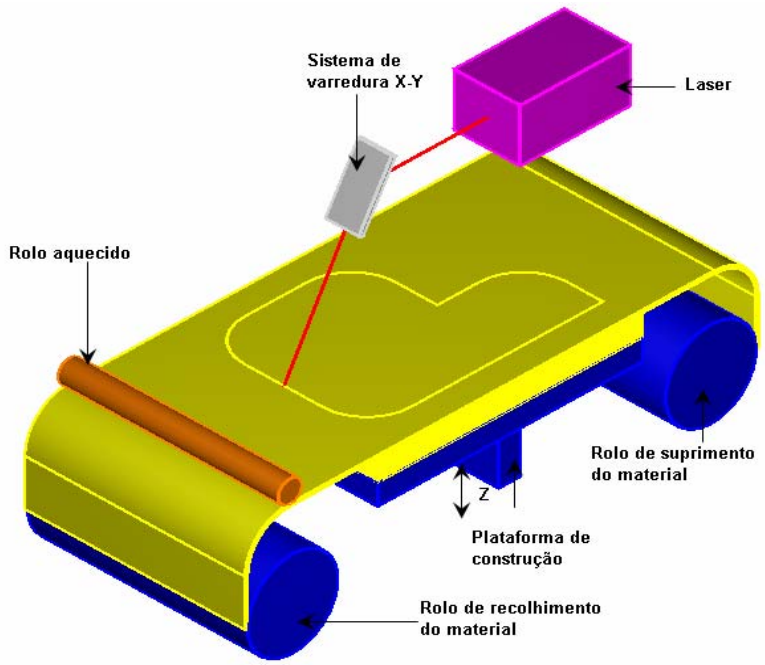


Figura 1 Princípio de funcionamento do processo LOM

O material que fica ao redor do produto serve de suporte durante o processo de construção. Desta maneira, a etapa de determinação das regiões que deveriam ter suporte durante o processo de construção do produto se torna desnecessária. Ao final do processo, tem-se um bloco retangular de material com o produto inserido em seu interior, que pode posteriormente ser extraído em uma operação manual (VOLPATO et al, 2007).

Materiais disponíveis

O processo pode empregar diversos materiais como: plástico, papel, cerâmica, tecido, folhas metálicas, ou folhas de papel do tipo Kraft, que contém um adesivo termicamente ativado à base de polietileno.

De acordo com Volpato et al (2007), este material pode ser facilmente obtido, com melhor custo-benefício e não agride o ambiente nem o operador.

A empresa Cubic também disponibiliza um filme plástico para os seus equipamentos.

A LOM também necessita de pós-processamento do produto finalizado. Lixamento, polimento e pintura podem ser realizados após a construção do produto. Adicionalmente ao pós-processamento, aplicam-se uretano, silicone ou resina epoxy de forma a selar o produto evitando danos causados pela umidade.

Ainda segundo Volpato et al (2007) uma característica importante deste processo é o controle em tempo real da altura das camadas durante a deposição. Este controle permite que o sistema fatie o modelo 3D após a leitura da posição da última camada depositada. Desta forma, consegue-se definir com boa precisão a coordenada Z com que o modelo deve ser seccionado camada após camada.

Como o processo não possui nenhuma transformação física ou química de fase, bem como condições especiais de manufatura, ele pode ser interrompido momentaneamente e reinicializado sem sacrifício da qualidade do produto.

Vantagens da LOM da Cubic Technology

Volpato et al (2007) descrevem como principais vantagens deste processo:

- os materiais não necessitam de pós-cura;
- não é necessário a criação e suportes em regiões desconectadas;
- alta velocidade do processo, devido ao fato de que o laser percorre somente o perímetro da camada e não toda a sua superfície como em outros processos de RP.

Upcraft e Fletcher (2003) também destacam algumas vantagens da LOM.

- a possibilidade de se fabricar peças de grandes dimensões;
- a possibilidade de se perfurar e laminar as peças.

Desvantagens da LOM da Cubic Technology

Como desvantagens ou deficiências do processo Volpato et al (2007) identificam:

- pouca quantidade de materiais para obtenção de protótipos;
- devido ao fato do material aplicado não ser flexível, isso dificulta seu uso em aplicações e testes de montagens em sistemas de encaixe rápido (*snap-fit*).
- o pós-processamento do produto é demorado e trabalhoso;
- o processo não é recomendado para produtos que possuam pequena espessura de parede ou elevado nível de detalhamento, pois é difícil a retirada do material picotado ao final do processo.

Upcraft e Fletcher (2003) ainda apresentam outras desvantagens da LOM.

- as peças em madeira com secções transversais pequenas apresentam pouca resistência. Além disso, absorvem umidade a menos que sua superfície seja tratada.
- o acabamento superficial antes do pós-processamento é pobre quando comparado às outras técnicas de RP.

Tecnologia com lâminas de papel (PLT) da Kira

Esta tecnologia foi desenvolvida em 1994 no Japão pela empresa Kira Corporation Ltd e se assimila muito com a LOM. Uma diferença básica é o uso de um sistema mecânico para o corte do papel, ao invés do laser (VOLPATO et al, 2007).

Método da PLT da Kira

De acordo com Volpato et al (2007), esta tecnologia disponibiliza duas formas de fornecimento de papel. Para um determinado equipamento, as folhas são fornecidas previamente cortadas, similar ao tamanho A4 (210 mm x 297 mm). Para esta condição, um sistema de alimentação do equipamento coleta as folhas e as deposita na plataforma de construção. Na segunda forma, o papel é fornecido em um rolo semelhante ao processo de LOM, e posteriormente cortado pelo sistema no tamanho adequado, semelhante ao formato A3 (297 mm x 420 mm). A figura 2 demonstra o princípio deste processo bem como as duas condições de fornecimento do material.

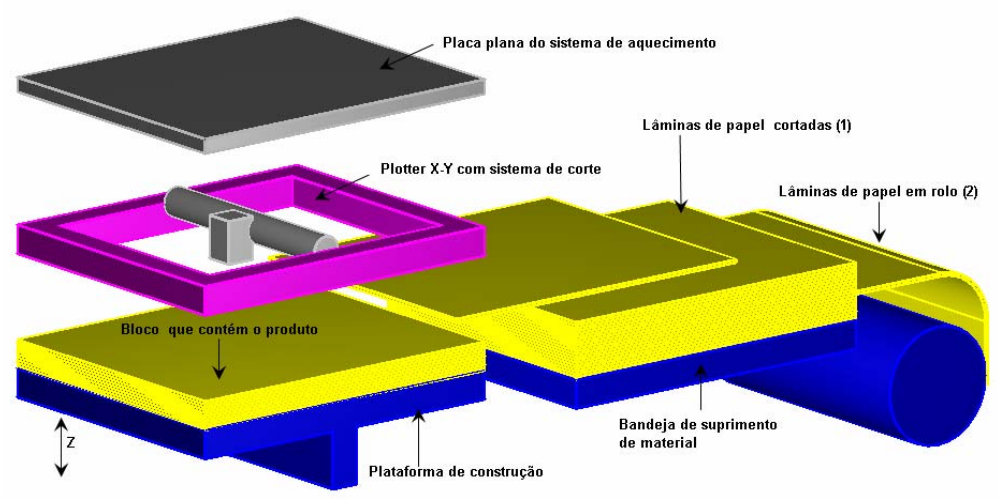


Figura 2 Princípio de funcionamento do processo PLT

Uma vez que o equipamento está abastecido com as folhas cortadas, o processo de construção do produto se mantém para ambos os equipamentos.

O processo de fabricação também difere da LOM. Primeiramente, ocorre a deposição de um pó de resina na geometria 2D obtida pelo fatiamento do modelo gerado em CAD. Posteriormente, a lâmina de papel é depositada sobre a plataforma de construção que se eleva prensando-a contra uma placa plana aquecida, ativando o adesivo localizado na parte inferior da lâmina de papel. Este processo possibilita a remoção de bolhas de ar entre as folhas. As lâminas então são coladas subseqüentemente, somente nas regiões em que haja deposição do pó de resina.

Isto facilita a remoção posterior do material que não compõe o produto final. A plataforma de construção então se desloca para baixo. Uma faca corta o perfil do produto em construção e picota o material restante da lâmina de papel.

De forma análoga ao processo de LOM, o material que não faz parte do produto serve de suporte natural, devendo ser retirado após o termino da construção do produto manualmente.

Este processo também necessita de pós-processamento, onde o produto passa por etapas de retirada do excesso de material, lixamento e polimento, de acordo com a sua aplicação.

Vantagens da PLT da Kira

Volpato et al (2007) destacam como principais vantagens deste processo:

- não utilização do laser;
- pós-cura desnecessária do material;
- não utilização de suportes em regiões desconectadas;
- planicidade proporcionada pelo sistema de alta pressão da placa plana contra as lâminas de papel, evitando distorções no produto durante o processo de fabricação.

Desvantagens da PLT da Kira

Da mesma forma, algumas desvantagens são apresentadas por Volpato et al (2007):

- pouca disponibilidade de materiais para obtenção de protótipos;

- falta de flexibilidade do material, o que dificulta sua aplicação em sistemas de encaixe rápido (*snap-fit*);
- devido à impossibilidade de retirada dos suportes do interior do produto após o processo de fabricação, é necessário que o produto seja construído em mais de uma etapa;
- o pós-processamento para remoção do material picotado é trabalhoso, no entanto, mostra-se melhor que no processo de LOM;
- da mesma forma que no processo de LOM, o PLT não é indicado para produtos que se caracterizam com paredes finas, ou que sejam demasiadamente altos na direção vertical (em z). Isto pelo fato de que a resistência das paredes nesta direção é baixa, mesmo com a colagem e prensagem das lâminas de papel a alta pressão.

Impressão a jato de tinta (IJP) Benchtop da Solidscape

A principal diferença deste processo em relação ao desenvolvido pela empresa 3D Systems é que este utiliza dois cabeçotes de impressão tipo jato de tinta. O primeiro deposita uma material termoplástico para o produto e o segundo deposita uma cera que é utilizada como material de suporte (VOLPATO et al, 2007).

Método da IJP Benchtop

Um jato do material (líquido) é depositado na plataforma de construção que se solidifica em contato com o material anteriormente depositado. Então, o segundo cabeçote deposita a cera, construindo os suportes necessários.

Após a fabricação da camada, uma ferramenta tipo fresa trabalha a superfície da camada deixando-a plana e pronta para receber a próxima camada de material. Um sistema aspira às partículas remanescentes de material.

Materiais disponíveis

De acordo com Volpato et al (2007), somente dois tipos de materiais estão disponíveis para este processo, limitando sua aplicação à avaliação visual de *design*, prova de conceito e também como padrão para fundição tipo cera perdida.

Vantagens da IJP Benchtop

Como principais vantagens deste processo Volpato et al (2007) identificam:

- alta precisão. De acordo com Kai et al (2003) apud Volpato et al (2007) este sistema é capaz de atingir uma precisão de ± 0,025mm por mm nas direções X, Y e Z;
- o processo pode ser utilizado em ambiente e escritório, pois o material utilizado não é tóxico;
- pouca necessidade de pós-processamento do produto final.

Desvantagens da IJP Benchtop

Como desvantagens deste processo Volpato et al (2007) identificam:

- baixa quantidade de materiais disponíveis para obtenção de protótipos;
- de acordo com Kai et al (2003) apud Volpato (2007), o processo IJP Benchtop é consideravelmente lento quando comparado a outros processos de RP.

Fabricação da forma final a laser (LENS) da Optomec

O sistema *Laser Engineered Net Shaping* (LENS) da empresa Optomec utiliza um sistema de feixe de luz laser de alta-potência (500W a 4kW) para fundir metais pulverizados em estruturas completamente densas. Assim como as demais tecnologias de RP, a LENS também utiliza a informação contida no modelo geométrico do CAD para construção do produto camada por camada.

Método da LENS

Um pó metálico é direcionado por um bico ao ponto focal do laser de forma contínua, fundindo-se e, desta forma, aumentando o volume do produto. Este bico pode se movimentar nas direções X,Y e Z em relação a uma mesa que, possui a propriedade de se inclinar de ± 90º e rotação de ± 180º.

Além das propriedades de inclinação do bico, a mesa também pode inclinar e rotacionar. Assim, com esta variante nos 5 eixos, o equipamento permite a construção de vários detalhes, que normalmente exigiriam a fabricação e suportes.

Este processo é realizado em uma câmara com atmosfera controlada a base de gás argônio à baixa pressão, evitando assim a ação do oxigênio.

Segundo Kai et al (2003) apud Volpato et al (2007) as peças fabricadas por este processo necessitam de pós-processamento para tratamento da superfície, pois, a resolução em XY é de 0,5mm e de 5mm em Z.

Devido à fina formação dos grãos do material em função da rápida solidificação da poça fundida, as características mecânicas obtidas em peças maciças são boas.

Materiais disponíveis

Segundo o fabricante Optomec (2007) os seguintes materiais podem ser processados por esta tecnologia: o titânio, o níquel baseado em super ligas, o aço estanhado e os aços-ferramenta.

Vantagens da LENS

Volpato et al (2007) apresentam como principais vantagens da LENS:

- confecção do produto em material completamente denso e com alta qualidade mecânica;
- o processo não requer fase de pós-processamento em forno, exceto em operações de acabamento superficial;
- possibilidade de utilizar o processo para reparação de produtos danificados, gastos ou quebrados;
- pequena zona relativamente afetada pelo calor, o que reduz o impacto no substrato.

Desvantagens da LENS

Segundo Volpato et al (2007) a LENS também apresenta algumas desvantagens:

- alto consumo de energia;
- obtenção de peças em um único tipo de material (metal);
- problemas na criação de suportes, as regiões desconectadas do produto são de difícil construção;

- acabamento superficial não muito bom quando comparado aos outros processos de RP.

Impressão tridimensional (3DP) ProMetal da Ex One Corporation

Bastante similar ao processo da 3DP da Z Corporation, este processo também utiliza um rolo para espalhar o pó de fabricação sobre uma câmara de construção.

Método da 3DP ProMetal

Segundo Volpato et al (2007) o material na forma de pó é coletado de um reservatório de suprimento, sendo espalhado e nivelado por um rolo sobre a superfície de um pistão onde o produto será construído.

O sistema de espalhar e nivelar retorna a sua posição inicial. Então, um cabeçote de jato de tinta aplica um aglutinante fotopolimérico sobre o material depositado, conforme geometria 2D da camada gerada pelo sistema CAD. O sistema de espalhar e nivelar avança parcialmente, enquanto uma luz UV se posiciona sobre a camada impressa do produto para curá-la.

Uma vez que a cura é concluída, uma plataforma de construção desce no sentido vertical (em z) e dispõe mais uma camada de material com espessura definida, para ser novamente processada. Este processo se repete até a conclusão do produto.

O material não processado atua como suporte natural durante a fase de construção, não havendo necessidade de se criar suportes estruturais durante o fatiamento do modelo 3D no sistema CAD.

A 3DP ProMetal também necessita de uma fase de pós-processamento. A peça finalizada não possui resistência suficiente par aplicação final. O pós-processamento é dividido em duas etapas. Na primeira etapa, o produto é aquecido queimando o aglutinante, dando início a sinterização metálica das partículas. Ao final desta fase tem-se o produto com uma porosidade de 60%.

Na segunda etapa, o produto é colocado em um forno a 1100ºC. Pela ação da capilaridade uma liga de bronze é infiltrada obtendo-se então uma peça completamente densa (VOLPATO et al, 2007). Após a conclusão destas duas etapas, o produto ainda necessita de acabamento superficial como lixamento, polimento ou usinagem.

Materiais utilizados

Segundo Kruth et al (1998) apud Volpato (2007) para o aglutinante utiliza-se o látex coloidal e o material utilizado é o aço-ferramenta com tamanho de partícula entre 50-60mm.

Vantagens da 3DP ProMetal

Volpato et al (2007) identificam como principais vantagens desta tecnologia:

- não utilização de laser;
- rapidez do processo;
- possibilita a construção de peças grandes, podendo atingir dimensões de 1000x500x250mm.
- os suportes são produzidos de forma natural através do material não utilizado durante a fase de construção, além de poder ser reutilizado;
- possibilita a fabricação de canais de refrigeração em insertos para moldes de acordo com a geometria da peça.

Desvantagens da 3DP ProMetal

Volpato et al (2007) também identificam como desvantagens deste processo:

- possibilidade de fabricação em apenas um tipo de material;
- necessita de pós-processamento em duas etapas, utilizando forno a alta temperatura.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo