

70

2001

SÃO PAULO

Dissertação de Mestrado apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia.

AValiação DAS MUDANÇAS OCORRIDAS NO DESENVOLVIMENTO DE
PRODUTOS DEVIDAS À UTILIZAÇÃO DE MODELOS PRODUZIDOS POR
PROTOTIPAGEM RÁPIDA

JOÃO HENRIQUE SILVEIRA ALVES DE OLIVEIRA

JOÃO HENRIQUE SILVEIRA ALVES DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DAS MUDANÇAS OCORRIDAS NO DESENVOLVIMENTO DE
PRODUTOS DEVIDAS À UTILIZAÇÃO DE MODELOS PRODUZIDOS POR
PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Dissertação de Mestrado apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Area de Concentração:

Engenharia de Projetos e Fabricação

Orientador:

Dr. Paulo Carlos Kaminski

São Paulo

2001

As pessoas que buscando um sentido para as suas vidas, ainda não o conseguiram encontrar. Aos meus pais, irmãs, orientador e amigos que com sua convivência e exemplo me fazem trabalhar com alegria e motivação. A Deus a Quem todos devemos tudo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Carlos Kaminski que, compreensivo e incentivador, soube encaminhar-me em toda as fases da pesquisa, não permitindo que eu perdesse de vista o enfoque principal do trabalho. Com ele aprendi não só a pesquisar, mas diversas noções de ordem, responsabilidade e perseverança no esforço empreendido.

À minha família que acompanhou com grande zelo e compreensão todo o processo de desenvolvimento da pesquisa, ajudando-me em tudo o que foi preciso. Aos meus amigos que, não só durante a pesquisa, mas sempre, são um apoio seguro e motivo de muitas alegrias.

Aos meus colegas da sala de pós-graduação que, lado a lado, acompanharam-me no empenho por chegar até o fim desta dissertação.

Aos Professores da Escola Politécnica, especialmente ao Prof. Dr. Gilberto Francisco M. Souza que foi meu primeiro incentivador na Escola Politécnica e ao Prof. Gilmar Ferreira Batalha pelo seu interesse e auxílio.

Aos profissionais da área de prototipagem rápida que me ajudaram fornecendo dados, tirando dúvidas e mostrando-me os equipamentos. Sou especialmente

grato aos profissionais da Robtec – Sérgio Oberlander e sua equipe: Rogério, Luiz Correa e Sebastian Deniz pelo incentivo e disponibilidade demonstrados para o desenvolvimento da pesquisa; a Fábio Andreotti da Sysgraph; a Oswaldo Ravanini, que me atendeu e forneceu material para estudo enquanto trabalhava na Flag;

Aos profissionais do CEFET-PR que me possibilitaram o aprendizado na operação de uma máquina de prototipagem rápida, além de outras informações importantes: Prof. Dr. Jorge Luiz Erthal, Prof. Dr. José Fogiatto e Prof. Dr. Nery Volpato.

Aos profissionais Eng.º Luiz Adalberto dos Santos e Giorgio Bampi Jr. Que me concederam parte de seu tempo para as entrevistas para os estudos de caso.

Aos pesquisadores do Cinject da Universidade Federal de Santa Catarina que me disponibilizaram dados sobre as pesquisas realizadas em sua escola.

A Silvio Francisco Brumatto por me ter possibilitado utilizar as instalações da Universidade Federal do Paraná para o encerramento da dissertação.

A todas as bibliotecárias e secretárias que me ajudaram a marcar entrevistas, conseguir artigos e a tirar cópias.

A todos que direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

ERRATA

João Henrique Silveira Alves de Oliveira
Departamento de Engenharia Mecânica
Data da Defesa: 16 de Outubro de 2001

| PÁGINA | LINHA | ONDE SE LE | LEIA-SE |
|--------|-------------------------------------|--------------------------------|---|
| V | 09 | Que | que |
| 06 | 08 | colidas | coltadas |
| 06 | 22 | das informações | das informações |
| 12 | 10 | mas erros | erros |
| 15 | 03 | título inferior da FIGURA 2.01 | Desenvolvimento do processo reorganizado com modelos reorganizado com utilização de |
| 18 | 03 | tese | dissertação |
| 20 | 07 | JP5 | JP5 |
| 20 | 10 | dos processo | dos processos |
| 22 | 18 | Ao longo dos próximos itens | Posteriormente |
| 28 | 06 | Possui | possui |
| 28 | 11 | JP5 | JP5 |
| 35 | 15 | V_{min} | V_{min} |
| 36 | 02 | Um lâmina | Uma lâmina |
| 38 | 16 | (extrudado), pela área | (extrudado), dividido pela área |
| 38 | 17 | V_{min} | V_{min} |
| 40 | último | acima de temperatura | acima da temperatura |
| 45 | 05 | (FIGURA 3.06). | . |
| 48 | 08 | possíveis: As TABELAS | possíveis. As TABELAS |
| 58 | última | para cada método | para cada método. |
| 59 | 16 | resistência à tensão | resistência à tração |
| 68 | 01 da FIGURA 4.05 | Insertos produzidos por | Insertos produzidos por SLS |
| 69 | 6, 7 e 8 da TABELA 4.01 (7ª coluna) | 0,0127 | 0,127 |
| 72 | 09 | material termopolimero | material termopolimérico |
| 79 | 05 | desempenho mais eficientes | desempenho mais eficiente |
| 87 | última | as mudanças não supõe | as mudanças não supõem |
| 91 | 09 | fase de concepção, | fase de concepção. |

| | | | |
|---------------|--------------|---------------------------------|-----------------------------|
| PÁGINA | LINHA | ONDE SE LE | LEIA-SE |
| 95 | 01 | ANEXO B | ANEXO C |
| 100 | 02 | até se convergir para a | até se atingir a |
| 103 | 08 | é apresentado um modelo | é apresentada uma proposta |
| 113 | 20 | interferência entre o e o cofre | interferência entre o cofre |
| 123 | 14 | Na Improved | An Improved |
| 137 | última | Os três primeiros | * Os três primeiros |
| 139 | 01 | ASIMOV | ASIMOV |

Na figura 6.02 não saiu impresso o item 5) Protótipos Rápidos Feitos em ferramenta direto.

Incluir na lista de abreviaturas:

- CAD: *Computer Aided Design*;
- CAM: *Computer Aided Manufacturing*;
- CAE: *Computer Aided Engineering*;
- CNC: *Computer Numerical Control*.

Incluir na TABELA 4.01, página 69, a seguinte observação:

As tolerâncias dos moldes variam conforme sua dimensão, ou seja, a tolerância 0,05/25 significa que a tolerância do molde aumenta em 0,05 mm a cada 25 mm e, portanto, um molde de 50 mm possui 10 mm de tolerância. As tolerâncias das peças são sempre maiores que as dos moldes e, conseqüentemente, sofrem também essa variação, embora isto não tenha sido indicado.

| | |
|--|------|
| LISTA DE TABELAS | X |
| LISTA DE FIGURAS | XI |
| LISTA DE ABREVIATURAS | XIII |
| RESUMO | XV |
| ABSTRACT | XVI |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 IMPORTÂNCIA DE UTILIZAR-SE MODELOS | 9 |
| 2.1 Utilizações dos modelos no desenvolvimento de produtos | 12 |
| 2.2 Classificação de modelos | 16 |
| 3 SOBRE A PROTOTIPAGEM RÁPIDA | 18 |
| 3.1 Conceito e nomenclaturas | 18 |
| 3.2 Classificações dos processos RP | 19 |
| 3.2.1 Classificação por princípio de adição das camadas | 19 |
| 3.2.2 Classificação por controle de fabricação das camadas | 22 |
| 3.2.3 Classificação por estado inicial da matéria | 22 |
| 3.3 Histórico da tecnologia | 24 |
| 3.4 Aplicações e avanços na última década | 31 |
| 3.5 Processos RP | 33 |
| 3.5.1 Estereolitografia (<i>Stereolithography</i> - SL) | 33 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 3.5.2 | Modelamento por deposição de material fundido (<i>Fused Deposition Modeling</i> - FDM) | 37 |
| 3.5.3 | Sinterização seletiva por laser (<i>Selective Laser Sintering</i> - SLS) | 40 |
| 3.5.4 | Fabricação de objetos laminados (<i>Laminated Object Manufacturing</i> - LOM) | 43 |
| 3.5.5 | Outros processos | 46 |
| 3.6 | Comparação entre os processos RP | 46 |
| 3.7 | Comparação entre as performances de cada sistema | 56 |
| 4 | DERIVAÇÕES DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA | 58 |
| 4.1 | Moldes e Ferramentas para a obtenção de modelos em série | 58 |
| 4.1.1 | Molde de silicone | 59 |
| 4.1.2 | Ferramenta epóxi | 60 |
| 4.1.3 | Molde produzido por pulverização metálica | 62 |
| 4.1.4 | Outros processos para obtenção de moldes | 65 |
| 4.2 | Impressoras 3D ou geradores de "pré-modelos" | 70 |
| 4.2.1 | <i>JP System 5</i> | 71 |
| 4.2.2 | <i>Thermojet</i> | 72 |
| 4.2.3 | <i>Genesys</i> | 73 |
| 5 | CONCEITO DE PROJETO | 75 |
| 5.1 | Processo de desenvolvimento de produtos (PDP) | 75 |
| 5.1.1 | Metodologia de projeto apresentada por BAZZO; PEREIRA | 76 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.1.2 | Metodologia de projeto apresentada por FERREIRA; MIGUEL (1999)..... | 81 |
| 5.1.3 | Metodologia de projeto apresentada por ASIMOW (1968)..... | 86 |
| 5.2 | Considerações sobre algumas características de projeto: simulação, otimização e criatividade | 89 |
| 5.2.1 | Simulação..... | 90 |
| 5.2.2 | Otimização..... | 90 |
| 5.2.3 | Criatividade..... | 91 |
| 6 | MUDANÇAS OCORRIDAS NO PROCESSO DE PROJETO..... | 94 |
| 6.1 | Etapas do projeto..... | 94 |
| 6.1.1 | Estudo de viabilidade:..... | 95 |
| 6.1.2 | Projeto básico:..... | 96 |
| 6.1.3 | Projeto executivo:..... | 96 |
| 6.1.4 | Planejamento da produção/execução:..... | 97 |
| 6.1.5 | Planejamento da disponibilização ao cliente:..... | 97 |
| 6.1.6 | Planejamento do consumo ou utilização do produto:..... | 97 |
| 6.1.7 | Planejamento do abandono do produto:..... | 98 |
| 6.2 | Vantagens da RP com relação aos métodos tradicionais de prototipagem..... | 98 |
| 6.3 | Conceito de espiral de projeto..... | 99 |
| 6.4 | Modelo de utilização da RP dentro da espiral de projeto..... | 103 |
| 7 | ESTUDO DE CASOS | 104 |
| 7.1 | Questionário utilizado..... | 104 |
| 7.2 | Resultados do questionário..... | 104 |

| | |
|--|-----|
| 7.2.1 Empresa A..... | 104 |
| 7.2.2 Empresa B..... | 107 |
| 8 CONCLUSÃO..... | 115 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 119 |
| ANEXO A: Lista de artigos sobre prototipagem rápida pesquisados..... | 123 |
| ANEXO B: Classificação dos processos de ferramental rápido..... | 138 |
| ANEXO C: Comparação dos processos de projeto..... | 139 |
| APÊNDICE..... | ! |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|--|----|
| TABELA 2.01 | CUSTO DE MUDANÇAS DE ENGENHARIA EM VÁRIAS ETAPAS DO PDP, CONFORME VOLPATO (1999) | 15 |
| TABELA 3.01 | CLASSIFICAÇÃO POR MÉTODO | 21 |
| TABELA 3.02 | FUNDAÇÃO DOS PRODUTORES DE EQUIPAMENTOS RP | 25 |
| TABELA 3.03 | - VENDAS POR SISTEMA E POR EMPRESA | 27 |
| TABELA 3.04 | EQUIPAMENTOS VENDIDOS PELA SISGRAPH NO BRASIL | 29 |
| TABELA 3.05 | SISTEMAS COMERCIAIS RP | 33 |
| TABELA 3.06 | VELOCIDADE DE FABRICAÇÃO E RESOLUÇÃO DOS DIVERSOS PROCESSOS RP | 49 |
| TABELA 3.07 | ENERGIA DESPENDIDA EM CADA PROCESSO, RUGOSIDADE FINAL DO PROTÓTIPO E NÚMERO DE ETAPAS DE CADA PROCESSO | 50 |
| TABELA 3.08 | CUSTOS PARA COMPRA DAS MÁQUINAS DE RP | 51 |
| TABELA 3.09 | VANTAGENS DE CADA PROCESSO RP | 52 |
| TABELA 3.10 | DESVANTAGENS DE CADA PROCESSO RP | 55 |
| TABELA 4.01 | COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE FERRAMENTAL 69 | 74 |
| TABELA 4.02 | COMPARAÇÃO DOS GERADORES DE "PRÉ-MODELOS" | 74 |

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1.01 Porcentagem dos artigos pesquisados 4
- FIGURA 2.01 Aumento da taxa de sucesso de um PDP (cfr. VOLPATO (1999)) 15
- FIGURA 3.01 Empregos industriais da RP (Fonte: *Wohlers Associates*) 32
- FIGURA 3.02 Esquema de formação da peça por estereolitografia (adaptado de www.cs.hut.fi/~ado/tp/subsection3_6_1.html#SECTION00061000000000000000; em 24/08/01) 37
- FIGURA 3.03 Esquema de deposição de material (FDM). FONTE: www.stratasys.com 39
- FIGURA 3.04 Esquema de formação de uma peça por sinterização a laser (adaptado de www.cs.hut.fi/~ado/tp/subsection3_6_3.html#SECTION00063000000000000000; em 24/08/01) 42
- FIGURA 3.05 Esquema de um objeto sendo formado no processo LOM (adaptado de www.cs.hut.fi/~ado/tp/subsection3_6_4.html#SECTION00064000000000000000; em 24/08/01) 45
- FIGURA 4.01 Fabricação de peças com o uso de moldes de silicone (GOMIDE (2000)) 60
- FIGURA 4.02 Ferramental de epóxi (adaptado de PHAM et al. (1997)) 62
- FIGURA 4.03 Aspersão metálica (adaptado de PHAM et al. (1997)) 64
- FIGURA 4.04 Moldes fabricados por *Direct Aim* (adaptado de PHAM et al. (1997)) 67

- FIGURA 4.05 Processo *Rapid Tool* (adaptado de PHAM et al. (1997)) 68
- FIGURA 4.06 Corte e montagem do modelo *JP System 5* (FONTE: www.jpssystem5.com/jpsystem5 – julho de 2001) 71
- FIGURA 4.07 Esquema de funcionamento do equipamento *Thermojet* (adaptado de www.impleg.com/foundry/multijet.htm; em 24/08/01) 72
- FIGURA 4.08 Foto de uma máquina Genesys (FONTE: www.stratatsys.com) 73
- FIGURA 5.01 Método da “caixa-preta” 77
- FIGURA 5.02 Fluxograma do processo iterativo 79
- FIGURA 5.03 Etapas de um processo de projeto apresentadas por FERREIRA; MIGUEL (1999) 85
- FIGURA 6.01 Exemplo de uma Espiral de Projeto: a cada volta o produto é aprimorado 102
- FIGURA 6.02 Modelo de uma espiral de projeto com a utilização de protótipos rápidos adequados para cada ciclo 103
- FIGURA 7.01 Fluxograma de informações durante o projeto 111

LISTA DE ABREVIATURAS

| | | |
|----------------------|---|---|
| RP | – | Prototipagem Rápida |
| SFR | – | Sistema Físico Real |
| PDP | – | Processo de Desenvolvimento de Produtos |
| 3D | – | Tridimensional |
| ARP | – | Árvore de Pré-Requisitos |
| SIGLAS DOS PROCESSOS | | |
| SLA | : | Stereolithography Apparatus |
| SLS | : | Selective Laser Sintering |
| SGC | : | Solid Ground Curing |
| LOM | : | Laminated Object Manufacturing |
| 3DP | : | 3-Dimensional Printing |
| FDM | : | Fused Deposition Modelling |
| SCS | : | Solid Creation System |
| SOMP | : | Solid Object Ultraviolet-laser Plotter |
| SAHP | : | Selective Adhesive and Hot Press |
| MJM | : | Multi-Jet Modeling system |
| DSPC | : | Direct Shell Production Casting |
| MJS | : | Multi-phase Jet Solidification |
| BPM | : | Ballistic Particle Manufacturing |

TSF: Fabricação Topográfica de sólidos

JPS: *JP System 5*

PLT: Tecnologia de laminação de papel

LENS: *Laser Engineered Net Shaping*

RESUMO

A tecnologia de Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping* – RP) desenvolveu-se intensamente na última década, acelerando o processo de projeto devido à facilidade de utilização de “protótipos”. Os métodos de processo devem ser reavaliados para que seja possível render ainda mais o potencial desta tecnologia.

Neste trabalho é feito um breve histórico da tecnologia, são apresentados alguns conceitos e algumas classificações e é também apresentado um resumo dos equipamentos mais acessíveis no Brasil, com suas vantagens e desvantagens. Após uma análise de processos de projeto, também é sugerido um modelo de utilização de protótipos e dos equipamentos correspondentes para cada etapa de projeto. Por fim é feito um estudo de caso em duas empresas utilizando-se entrevistas feitas em empresas que estão utilizando RP.

Verificou-se ao longo da pesquisa que fica justificada a utilização da RP em empresas que desenvolvem produtos, procurando-se prever em cada caso que tipo de “protótipos” atendem aos requisitos do projeto em cada situação.

ABSTRACT

The Rapid Prototyping (RP) technology has been intensely developed in the last decade, speeding up the design process due to easiness of the use of "prototypes". The process methods must be reevaluated so that it is possible to profit still more the potential level of this technology.

In this work a historical briefing of the technology is made, it is presented some concepts and classifications and it is also presented a summary of the most accessible equipment in Brazil with its advantages and disadvantages. After an analysis of design processes, it is also suggested a model of the use of "prototypes" and the corresponding equipment for each stage of the design. Finally, a study of case in two companies is presented using interviews made in RP users companies.

During the research it has been verified that it is justified the use of the RP in companies that develop products, trying to foresee in each case which type of "prototypes" takes care of the design requirements in each situation.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo demonstrar que o advento da tecnologia Prototipagem Rápida tem facilitado a utilização de modelos, auxiliando o processo de desenvolvimento de produtos. Ao longo do texto são apresentadas as vantagens de utilizar-se modelos, suas limitações e diversas aplicações dentro de uma metodologia de projeto.

Como dentro da tecnologia de fabricação por camadas - característica mais importante da tecnologia RP – são diversos os modos de composição dos materiais para a produção de modelos, cada um com características distintas, procurou-se fazer um breve resumo dos principais sistemas RP utilizados no Brasil e sua aplicação em casos específicos de utilização de modelos. Este estudo pode servir de orientação para a compra de um equipamento ou para a requisição de serviços, ou simplesmente como um primeiro conhecimento das possibilidades dos sistemas.

Como não há uma metodologia de projeto única e consolidada, procurou-se fazer uma análise do que três autores escreveram sobre o assunto. Dentro do conceito espiral de projeto é sugerida a aplicabilidade de diversas classes de modelos, de modo a acelerar o processo e criar maior integração entre as equipes de trabalho.

São apresentados dois casos para estudo e é feita uma análise sobre o modo como a tecnologia influenciou no desenvolvimento do projeto.

O tema deste trabalho foi escolhido principalmente porque a tecnologia: é recente e com crescente utilização e interesse mundial; possui perspectiva de tornar-se

uma nova técnica de fabricação; pode ser utilizada em outras áreas que utilizam manufatura além da engenharia; é um excelente instrumento de comunicação visual; é recente e as pesquisas são ainda incipientes no Brasil, sendo que a primeira tese foi concluída em abril de 2000.

Ao longo da pesquisa foram encontrados alguns problemas:

- o material de pesquisa no princípio era escasso e impreciso (comercial);
- escassez de publicações em língua portuguesa;

- dificuldade em adotar um referencial, já que a tecnologia é recente e os avanços na tecnologia muitas vezes tornam “obsoletas” as informações anteriores. Nesses casos as novidades são veiculadas informalmente, “em primeira instância” via Internet, e por isso mesmo essas informações são “instáveis” e muitas vezes pouco confiáveis cientificamente, tornando difícil sua utilização na pesquisa. Por exemplo, foi obtida uma cópia impressa de um quadro comparativo dos equipamentos de Prototipagem Rápida utilizados pela *Nasa*, mas não foi possível localizar novamente essas informações na *internet* acessando-se o mesmo *site*.

No entanto, alguns referenciais teórico-metodológicos foram tomados como base:

WOHLERS (1998) é um livro sobre Prototipagem Rápida cujo autor é um dos precursores na pesquisa sobre a tecnologia e consultor mundial;

BAZZO; PEREIRA (1997) é um livro de engenharia que aborda o tema sobre projeto, de modo a apresentar a teoria tradicional sobre o assunto. Este livro está baseado em diversas citações, várias delas largamente utilizadas nas escolas de engenharia mecânica;

KAMINSKI (2000) é um livro publicado a partir das disciplinas de Projeto

do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP;

Além desses referenciais foram pesquisadas as seguintes fontes:

- artigos de congressos e revistas (foram pesquisados pelo menos 100 títulos de autores de diversos países, de publicações científicas e de bases de dados diferentes);

- outros livros sobre projeto, produção, materiais, ergonomia, confiabilidade, etc.;

- filmes promocionais (com certo conteúdo técnico), folhetos de propaganda,

- catálogos e manuais de empresas;

- visitas técnicas e a feiras; entrevistas com profissionais da área - representantes

- dos sistemas (Robtec, Sisgraph, Flag), compradores dos equipamentos (CEFFT-

- PR), prestadores de serviço (Robtec, Flag e CEFFT) e seus usuários (Federal

- Mogoul, *Siemens*), pesquisadores e acadêmicos -;

- participação no I seminário: últimos avanços em prototipagem rápida e engenharia

- reversa; no VI simpósio de engenharia de produção; e apresentação da palestra

- “Prototipagem Rápida e Ferramenta Rápido” na semana de engenharia da UFPR;

- informações e discussões na *internet*.

De modo geral, a hipótese adotada no trabalho é de que a RP acrescenta qualidade, rapidez e economia ao processo de desenvolvimento de produtos, introduzindo a utilização mais freqüente de modelos no processo de desenvolvimento de produtos. As demais hipóteses para a confirmação da geral são:

1. A tecnologia RP tem grande aplicação e futuro no mercado, pois produz modelos com qualidade suficiente para atender os requisitos a serem estudados ao longo do

projeto;

2. A tecnologia possui um potencial grande de desenvolvimento e caminha para

novas utilizações;

3. Dentro dos conceitos de engenharia simultânea e de espiral de projeto, a

tecnologia pode ser considerada como um elemento de especial importância;

Para a comprovação das hipóteses, além das anotações feitas ao longo das

disciplinas do programa de mestrado, a coleta de informações foi feita da seguinte

maneira:

– no início apenas uma interação do assunto, tomando-se notas mas de pontos

genéricos;

– um segundo passo foi o aprofundamento e detalhamento das informações

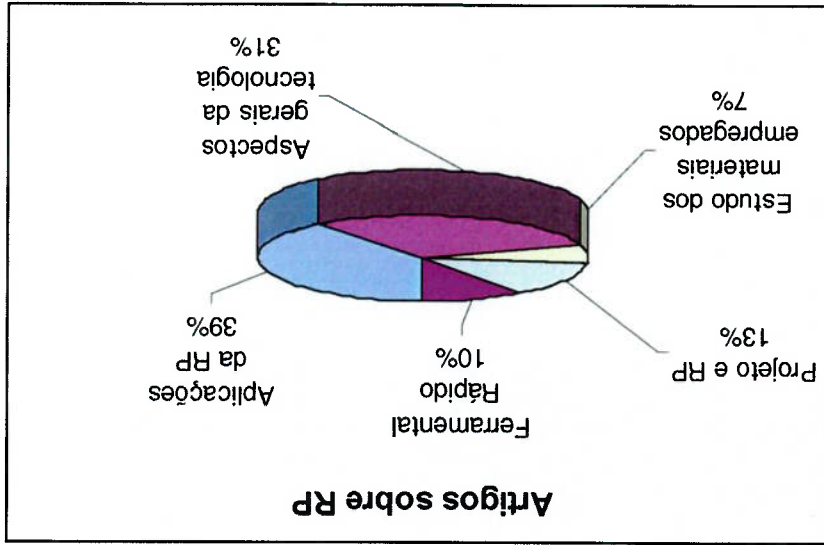
coletadas, separando-as por assunto;

– terceiro passo foi a busca de informações em bibliotecas e bases de dados por

título, autor e assunto com posterior separação dos artigos científicos através de

uma leitura prévia mais superficial, descartando-se os artigos de menor relevância;

FIGURA 1.01 Porcentagem dos artigos pesquisados



Desta triagem resultou uma relação de aproximadamente cem (100) artigos que encontra-se no Anexo A. Abaixo é feito um resumo dos principais temas tratados. Os artigos foram classificados dentro de cada tema segundo seu principal enfoque.

O gráfico da FIGURA 1.1 mostra a quantidade de artigos de cada tema.

Entre os trinta e nove (39) artigos sobre **aplicações da RP** foi separado apenas um artigo sobre arte, um sobre medicina e um sobre ensino, apesar de existir uma grande quantidade de artigos sobre esses temas. Sobre propriedades dos modelos e suas aplicações foram separados dezessete (17) que tratavam sobre aspectos diversos dos modelos, tais como análise térmica, dimensional, testes, elasticidade, comportamento mecânico, etc. Varias aplicações estavam relacionadas com a utilização da RP com outras tecnologias e foram enquadrados treze (13) artigos nesta subdivisão, sendo que três (3) são sobre micromodelos (nanotecnologia). Três (3) artigos fazem estudos mais profundos de casos em empresas e três (3) são sobre aspectos específicos das tecnologias.

Os artigos sobre os **aspectos gerais da tecnologia** fazem comparações, analisam os avanços tecnológicos, avaliam o mercado, tratam do estado da arte, sugerem classificações, etc.

Enquadram-se em **estudo dos materiais empregados** os artigos que pesquisam as possibilidades de utilizar-se novos materiais para produzir os modelos RP. Já em **projeto e RP** foram classificados os artigos que de algum modo analisam fases do projeto com a utilização de modelos RP. Estes artigos são bastante relevantes para a abordagem desta dissertação.

Os artigos sobre **ferramental rápido** tratam de modo geral e comparativo sobre as técnicas empregadas na obtenção de ferramentas utilizando-se a tecnologia RP.

Ao longo da pesquisa este tema foi ganhando cada vez mais interesse e atualmente há uma quantidade muito grande de artigos nesta área.

– numa quarta etapa foram lidos os artigos por ordem de maior interesse para a dissertação e embasamento científico, passando-se para a leitura de artigos mais específicos posteriormente. Nesta fase, muitos *papers* foram apenas gritados e classificados, somente os mais importantes resumidos, dependendo do interesse para a pesquisa;

– simultaneamente foram colidas informações durante as visitas técnicas aos representantes, prestadores de serviços e usuários da tecnologia, além das notas tomadas durante a participação nos eventos que envolviam o tema;

– após os contatos necessários, foram marcadas entrevistas que foram feitas baseadas em um questionário elaborado;

– por fim uma última coleta de dados foi feita acompanhando-se os serviços prestados pelo CEFET-PR, onde foi possível adquirir conhecimento através do manuseio de um equipamento RP.

Para analisar os dados utilizou-se em primeiro lugar de bom senso, mas de forma científica procurou-se:

– verificar a repetição de incidências da mesma informação nas publicações pesquisadas;

– fazer testes com produtos;

– trocar impressões com outros pesquisadores e acadêmicos;

– validar a confiabilidade das informações (natureza e autoridade da fonte e da própria informação);

- fazer entrevistas de acordo com um questionário, visando os estudos de caso em
 questão (este questionário foi validado comparando-o a um outro, empregado
 numa pesquisa feita por um dos representantes de um dos equipamentos no
 Brasil);
- validar o resultado da pesquisa submetendo-o a revistas e congressos;

Como o espaço amostral é pequeno - a tecnologia ainda é embrionária no
 Brasil; os equipamentos estão em cidades e centros de pesquisa distantes entre si; dentro
 do setor de desenvolvimento de produtos muitas informações são confidenciais; e a
 obtenção de "amostras" é relativamente cara - não foi feita uma análise propriamente
 estatística. No entanto, as prestadoras de serviço por possuírem um volume de casos
 grande, estão capacitadas a dar informações bastante confiáveis, embora sem pleno rigor
 científico.

O texto está organizado da seguinte forma:

1) Introdução;

2) Sobre a utilização de modelos:

- importância dos modelos no desenvolvimento de produtos;
- utilização dos modelos;
- classificação dos modelos;
- modelos produzidos por RP.

3) Sobre a prototipagem rápida:

- nomenclatura e conceito;
- vendas de equipamentos;
- equipamentos existentes no Brasil;
- utilizações da RP;

- aplicações da RP;
- princípios de adição empregados.
- 4) Derivações da RP:**
 - ferramental rápido;
 - impressoras 3D;
 - aplicações futuras e em outras áreas.
- 5) Sobre o processo de projeto:**
 - metodologias de desenvolvimento de produtos estudadas;
 - algumas características de projetos que a RP auxilia;
 - mudanças ocorridas no processo de projeto;
 - análise de rapidez, economia e qualidade.
- 6) Conceito de projetos: espiral de projeto e engenharia simultânea;**
- 7) Estudo de casos:**
 - empresa A;
 - empresa B;
- 8) Conclusão.**

2 IMPORTÂNCIA DE UTILIZAR-SE MODELOS

Segundo BREITINGER (1997), antes do advento da RP, os protótipos não eram utilizados na Europa até se chegar às últimas fases de projeto. A prática era fazer um protótipo completo somente antes da produção em série. A RP tem promovido sua utilização já nas fases iniciais do Processo de Desenvolvimento do Produto (PDP).

Conforme VOLPATO (1999), a evolução da prototipagem efetuou-se do

seguinte modo:

- **prototipagem manual:** existe há muito tempo, é artesanal, trabalhosa e demorada.
- **prototipagem virtual:** começou na década de 1980 com o crescimento das aplicações de CAD/CAE/CAM. Utiliza-se de modelos computacionais que podem ser testados, analisados e modificados virtualmente. Devido a esses recursos aumentou-se a complexidade dos produtos. Ainda é bastante utilizada.

- **prototipagem "usmada":** máquinas CNC têm sido utilizadas para a fabricação de protótipos físicos, diminuindo seu tempo de produção. Pode ser utilizada integrada com a prototipagem virtual. No entanto, possui restrições quanto aos formatos geométricos possíveis.

- **prototipagem rápida:** foi desenvolvida no fim da década de 1980 e tem sido considerada como um marco em termos de tecnologia de manufatura. Não dispensa

CAD/CAE/CAM.

Abaixo é feita uma comparação da RP com as máquinas CNC:

Os modelos sempre foram utilizados como ferramenta de auxílio no desenvolvimento de produtos. Tradicionalmente, os protótipos eram feitos através de operações de usinagem, tais como torneamento e furagem, etc. As peças podiam ser, então, montadas, coladas, parafusadas, rebitadas, encaixadas, permitindo a interação de

térmica/química de alguns processos.

— problemas com distorções, empenamentos e inchamento devidos à natureza

CNC;

— precisão e acabamento superficial inferiores do que o das peças produzidas em

aos metais e plásticos utilizados no CNC;

— os materiais empregados normalmente possuem propriedades mecânicas inferiores

empregados;

— limitação de aplicação devida às possibilidades de materiais que podem ser

Desvantagens de utilizar-se RP em relação às máquinas CNC:

— não são necessários cálculos complexos de caminhos das ferramentas.

— o componente é fabricado em uma única etapa de processo;

— não necessita troca de ferramenta de trabalho na maioria dos casos;

— não necessita de dispositivos especiais para fixação;

— independência da complexidade geométrica da peça;

Vantagens de utilizar-se RP em relação às máquinas CNC:

diversos materiais: madeira, materiais ferrosos, plásticos, etc. Entretanto quando se deseja obter protótipos de engenharia em lotes maiores, esses métodos ficam caros e demorados.

BARKAN e IANSITI (1993) afirmam que a utilização de protótipos, quando devidamente explorada, é essencial no processo de aprendizado dos envolvidos nas etapas do projeto durante o PDP, e que a rapidez nesta aprendizagem é a chave do desenvolvimento. Acrescentam que, no entanto, a utilização de protótipos ainda era muito reduzida na época em que escreveram o artigo, devido ao tempo e custo associados a sua fabricação.

É lógico que antes de produzir definitivamente um produto façam-se testes para ter-se uma certa previsão de seu desempenho. JACOBS (1992) escreve que “não existe maneira melhor de se certificar que uma peça complexa possui todas as características desejadas do que segurá-la na mão, girá-la algumas vezes e olhá-la de todos os lados”. A Prototipagem Rápida, na medida em que acelera e facilita o feitura de modelos, realça a importância de suas utilizações. Neste capítulo são apresentadas estas utilizações e alguns modos para classificar modelos.

Deve-se procurar a maior similitude possível entre os produtos e os protótipos, de tal modo que sejam feitos do mesmo material que será utilizado na produção final da peça e que possuam as mesmas dimensões para garantir semelhança de propriedades durante os testes. No entanto, de acordo com FERREIRA; LAFRATTA (1998) o processo de produção, tal como uma estampagem ou soldagem, altera características importantes do produto, diferenciando-o do protótipo testado.

Dai que, por mais criteriosa que seja a produção do modelo, os resultados

obtidos com um modelo (medidos) resultarão diferentes dos resultados previstos

(calculados), devido a dois fatores que é preciso ponderar:

– o modelo é limitado, e portanto comportar-se-á de acordo com as restrições

feitas à realidade ou à totalidade de desempenho do produto;

– o modelo não é único, ou seja, existem outras avaliações e soluções possíveis

que não somente aquela que o modelo quer representar.

É importante, portanto, verificar a relevância do modelo, validando-o pela

experimentação. O modelo enquanto simplificação de um sistema físico real (SFR) não

preve tudo e descarta fatores desprezíveis, mas erros de até 15% nos resultados com os

protótipos testados em muitos casos são admissíveis.

BAZZO; PEREIRA (1997) consideram ainda que:

“Embora uma divergência entre os resultados previstos e a realidade das

medições seja inevitável, a utilidade de um modelo não está em representar fielmente,

ou não, o SFR. Segundo este critério, todos os modelos teriam que ser rejeitados. Em

função das hipóteses simplificativas, deles deve-se esperar um certo grau de

discrepância com a realidade. O modelo é importante pela sua praticabilidade e pela

previsão que proporciona, e não necessariamente pela sua precisão”

2.1 Utilizações dos modelos no desenvolvimento de produtos

BAZZO; PEREIRA (1997) consideram que os modelos são utilizados

porque:

– é muito dispendioso construir todas as alternativas possíveis;

- o processo direto de construção pode ser impraticável, destrutivo ou perigoso;
 - o controle sobre o problema simplificado é maior porque este possui menos variáveis;
 - o tempo para verificação de desempenho é menor;
- A abstração da realidade através de um modelo é muito mais fácil porque se trabalha num domínio de conhecimento mais familiar.
- Dai que o modelo seja utilizado normalmente como:
- ferramenta para se pensar (visualizar): garantem maior compreensão.
 - meio de comunicação: visando aprovação do projeto ou análise de construção, operação, manutenção, etc.;
 - instrumento de previsão: verificando possíveis soluções através de simulações. Garantem maior precisão que o uso exclusivo do julgamento pessoal;
 - controle: o sistema físico real deve seguir as dimensões de um desenho, por exemplo;
 - ensaio e treinamento: instrução, suporte didático (exemplo: controladores de tráfego aéreo podem ser simulados sem que haja a possibilidade de que ocorram acidentes reais).
- Semelhantemente VOLPATO (1999) destaca as seguintes finalidades dos protótipos no PDP: aprendizagem, comunicação, integração e marco do projeto.
- **Aprendizagem** – os modelos podem ser construídos para responderem questões de projeto, funcionando como ferramentas de aprendizado a cada interação em que são utilizados.

– **Comunicação** – os modelos funcionam como catalisadores no processo de troca de informações num ambiente de projeto composto por pessoas de diversas habilidades e pontos de vista diferentes. A compreensão de um objeto físico é muito maior e mais rápida do que a de um desenho ou descrição verbal.

– **Integração** – promovem a integração entre os membros de uma organização multicultural e multifuncional por possuírem um mesmo veículo de entendimento comum e de comunicação. Utiliza-se de uma mesma fonte de dados. A possibilidade de simultaneidade de desenvolvimento, por exemplo na execução de uma montagem, integra a equipe promovendo soluções de projeto em conjunto.

– **Marco de projeto** – podem ser usados como marcos, estabelecendo objetivos a serem alcançados: possibilitam a demonstração de progressos e reforçam o uso de cronogramas.

Já quanto às vantagens de se usar modelos, apontadas pelo mesmo autor, pode resumir-se :

Redução de tempo e de custo: os custos com avaliações explorativas nas fases iniciais repercutem como grandes economias em fases mais avançadas do projeto, pois a cada etapa de projeto o custo de uma mudança torna-se maior, conforme TABELA 2.01. A inserção de etapas de prototipagem no PDP compensa o tempo que seria despendido posteriormente com correções de projeto. Também se garante aumento de qualidade.

TABELA 2.01 CUSTO DE MUDANÇAS DE ENGENHARIA EM VÁRIAS ETAPAS

DO PDP, CONFORME VOLPATO (1999)

| Etapas do PDP | Descrição | Custo médio por mudança |
|---------------|---|-------------------------|
| 1 | Fase de simulação preditiva | \$1.000 - 4.000 |
| 2 | Fase de testes, antes da liberação do produto | \$20.000 |
| 3 | Depois da liberação do produto | \$100.000 |

Além de diminuir a probabilidade de mudanças futuras, a taxa de sucesso

das informações para as etapas seguintes aumenta (FIGURA 2.01).

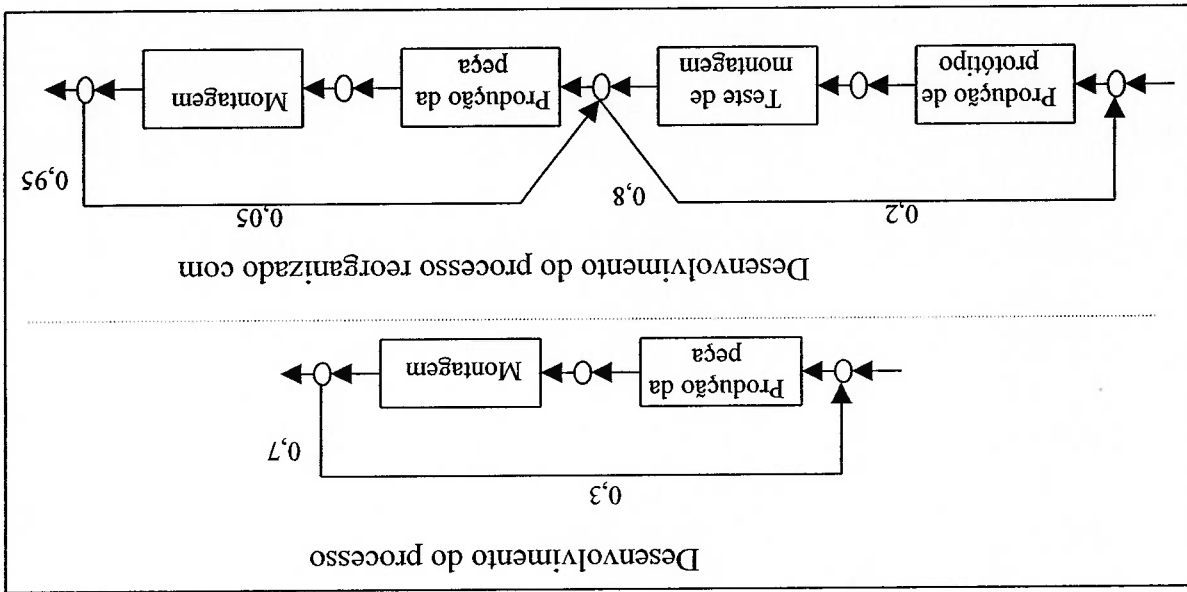


FIGURA 2.01 Aumento da taxa de sucesso de um PDP (cfr. VOLPATO (1999))

2.2 Classificação de modelos

Os modelos, de modo genérico, poderiam ser classificados da seguinte maneira:

Íconicos: representa a realidade de forma o mais fiel possível;

Representações gráficas: permitem rápida visualização, comunicação e previsão. Os desenhos são modelos deste tipo.

Diagramáticos: representam estruturas ou comportamentos através de linhas e símbolos;

Matemáticos: expressões matemáticas. São meios eficientes de previsão e de comunicação, devido à sua linguagem concisa e universal.

Quanto aos modelos feitos por Prototipagem Rápida, que são dos dois primeiros tipos apresentados acima, podem ser distintos da seguinte maneira:

MODELO CONCEITUAL: os modelos conceituais são modelos mais simples e limitados, utilizados principalmente como ferramentas para a comunicação visual em estudos ergonômicos, propostas para clientes, discussões sobre o projeto, avaliações de *design*, etc. São utilizados também para a verificação grosseira de montagens e encaixes. Poderiam ser classificados sob o conceito de representação gráfica acima citado;

PROTÓTIPO FUNCIONAL: estes modelos possuem um acabamento superficial menos grosseiro e melhor precisão que os modelos conceituais. Podem ser considerados como modelos icônicos, embora normalmente não sejam feitos necessariamente na mesma escala, material, etc. que o produto final. São modelos

utilizados para testes cujos resultados são mais definitivos para a produção do produto, tais como os testes de campo - nos que o modelo é utilizado como uma peça a mais de um produto que será utilizado por clientes-chave durante um período de teste -, de resistência mecânica (embora os modelos ainda não sejam suficientemente resistentes), de ajuste e tolerância. Podem ser utilizados, portanto, como ferramentas para previsão, controle, ensaios e treinamento;

PADRÃO PARA MOLDES: estes modelos servirão de padrões para moldes para fundição, injeção de plásticos, etc. Devem ser tão precisos quanto os moldes, ou seja, quanto o produto final. Na maioria dos casos, os moldes são feitos para que seja produzida uma pré-série para testes;

FERRAMENTAL DIRETO: neste caso o protótipo rápido já é uma parte, uma cavidade, um inserto do molde, que é produzido diretamente.

Estritamente, são considerados com o nome Protótipo, os primeiros exemplares de um produto, construídos para testes. No entanto, o nome popularizou-se tornando-se quase um sinônimo para modelo e neste último sentido é que é muitas vezes empregado ao longo desta dissertação.

3 SOBRE A PROTOTIPAGEM RÁPIDA

3.1 Conceito e nomenclaturas

Em sua tese GOMIDE (2000) apresenta o seguinte conceito:

“A fabricação por camadas refere-se aos diversos processos onde um objeto físico é construído diretamente de sua representação eletrônica em CAD, através do princípio de adição sucessiva de finas camadas de material” (GOMIDE, 2000, p. 02).

Desta forma pode-se considerar a RP como um novo processo, uma vez que normalmente os processos de fabricação para dar forma a um material eram baseados em remoção de massa (fresamento, torneamento, eletroerosão, corte a laser, usinagem de alta velocidade, etc.) ou conformação do material com conservação de massa (forjamento, estampagem, laminação, fundição, moldagem, etc.). A RP está baseada na adição de material (camada sobre camada): finas camadas de material são sucessivamente adicionadas (“empilhadas”), provenientes do fatiamento eletrônico do modelo CAD. Modelos sólidos ou superfícies criadas por um sistema CAD são convertidos para um arquivo STL. Tal arquivo é uma lista de facetas triangulares representando as superfícies de um objeto a ser construído, junto com um vetor unitário normal, associado à superfície exterior de cada triângulo.

A maioria dos sistemas possui processo de construção totalmente automatizado, portanto, a máquina pode ser preparada para ser utilizada durante a noite.

O programa que gerencia a máquina analisa o arquivo STL, fatia o modelo em seções transversais e dependendo do sistema, cria o suporte para o processo de produção. Após a construção do modelo, pode ser necessário pós-processamento para limpar, remover suportes, lixar, pintar, esperar pós-cura, etc.

Neste trabalho está sendo utilizada a nomenclatura mais comum: Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping* - RP), pelo fato de já ser um termo consagrado, no entanto, GOMIDE (2000) defende a utilização do nome Fabricação por camadas. Outros nomes que aparecem na literatura também são: Manufatura rápida; Fabricação de formas livres; Manufatura de mesa; e Impressão tridimensional.

3.2 Classificações dos processos RP

A seguir são apresentados alguns modos de classificação dos sistemas RP

3.2.1 Classificação por princípio de adição das camadas

Os princípios de adição empregados foram classificados por GOMIDE (2000) como mostrado a seguir, acrescidos dos principais processos equivalentes:

- cura seletiva ou estereolitografia: estereolitografia (SL), *Solid Ground Curing* (SGC);
- sinterização seletiva: sinterização seletiva por laser (SLS), *EOSint* (EOS);
- deposição contínua: deposição de materiais fundidos (FDM);

– “**impressão por jato de tinta**”: *Laser Engineered Net Shaping* (LENS), impressão

de objetos sólidos (SOP), *Multi Jet Modeling-Thermostat* (MJM);

– **deposição de “gota sobre pó”**: impressão tridimensional (3DP), fabricação topográfica de sólidos (TSF);

– **fabricação de objetos laminados**: laminação de objetos para modelos (LOM), JP

System 5 (JPS), tecnologia de laminação de papel (PLT).

Os processos SL, SLS, FDM, MJM, LOM e JP5 por serem os mais

utilizados no país, serão descritos posteriormente com maior detenimento, bem como os

processos de adição empregados em cada um deles.

CHUA et al. (1998) também fez uma classificação dos processo semelhante

à GOMIDE (2000) seguindo o critério de método empregado no feito do modelo. A

TABELA 3.01 apresenta esta classificação, sendo que os processos são representados

por siglas e entre parêntesis estão as empresas que detêm as tecnologias.

FONTE: CHUA et al. (1998)

| | |
|--|---|
| 1) Cura por laser (fotopolimerização) | |
| SGC (Cubital) | SL (3D System) Soliform (Teijin Seiki) SOUP (Mitsubishi) Stereos System (EOS) RP System (Meiko) |
| 4) Sinterização a laser | 3) Sobreposição de laminados |
| SLS (DTM) | LOM (Helisys) SAHP (KIRA) Zippy System (Kinergy) |
| 6) Adesivação | 5) Gotamento/deposição |
| MJM (3D System) DSPC (Soligen) 3D Printing (MIT) | MJS (Fraunhofer) FDM (Stratasys) |

TABELA 3.01 CLASSIFICAÇÃO POR MÉTODO

3.2.2 Classificação por controle de fabricação das camadas

JOHNSON (1994) classifica os processos RP de acordo com o controle de fabricação das camadas: a interação da massa de matéria-prima m e de energia W produz uma camada física com uma variação total de potência:

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

O primeiro termo representa um processo onde uma massa uniforme m é seletivamente ativada, removida ou colada por uma energia variável δW controlada pela descrição da camada. Podem ser classificadas de baixo deste conceito as tecnologias que utilizam agregação de moléculas ou partículas e laminação de folhas. O segundo termo representa um processo onde a infomação sobre a camada controla uma variação de massa δm ativada por energia controlada W . Deposição por gotejamento, deposição de partículas e deposição de material fundido são classificadas dessa forma.

3.2.3 Classificação por estado inicial da matéria

KOCHAN AND CHUA (1995) classificam os processos RP pelo estado inicial da matéria: sólidos, líquidos ou pós; e pelo método empregado: feixe simples ou duplo de laser, lâmpada, holografia, iluminação mascarada, corte e grudar/juntar, derreter e solidificar/fundir e juntar/colar.

Ao longo dos próximos itens, são utilizados alguns conceitos comparativos apresentados por CHUA et al. (1998), que são brevemente explicados a seguir:

O Volume mínimo V_{min} , que determina a resolução do objeto ($R = 1 / V_{min}$) é baseado na área mínima de imagem possível e na mínima espessura de camada.

Volume mínimo:

$$\text{total de camadas} (t_{passivo} = \sum(t_{recobrimiento} + t_{fatiamento} + t_{suporte}) / n.º \text{ camadas}).$$

fatiamento em camadas do arquivo STL, de produção de suporte, dividido pelo número

$t_{passivo}$ é a soma do total de tempo de recobrimiento da nova camada, de

t_{imagem} é o tempo de formação da imagem por camada

l é a espessura da camada

V_f é a velocidade de fabricação dos objetos

Onde:

$$V_f = l / (t_{imagem} + t_{passivo})$$

seguinte:

A velocidade de fabricação dos objetos pode ser descrita pela fórmula

Velocidade de fabricação dos objetos:

esta energia depende de fatores diversos.

necessária para transformar a matéria-prima e compor uma camada. Em cada sistema

Este fator de comparação entre sistemas determina a quantidade de energia

Energia específica

3.3 Histórico da tecnologia

O primeiro sistema de RP tornou-se comercialmente viável em 1988. Em 1998 foram vendidos 990 equipamentos, segundo WOHLERS (1999), totalizando em uma década de vendas, aproximadamente 4.250 equipamentos instalados no mundo. De acordo com WOHLERS (1996), o faturamento total dos sistemas de prototipagem rápida aproximava-se, já em 1996, de meio bilhão de dólares. A TABELA 3.02 apresenta uma cronologia do desenvolvimento de equipamentos.

Uma comparação entre os processos de RP é feita na TABELA 3.03, mostrando a quantidade de equipamentos e a porcentagem de equipamentos vendidos em todo o mundo no ano de 1997, segundo cada processo e fabricante. Pela tabela é possível verificar que o mercado está bem distribuído entre os cinco tipos de processos, mas que duas empresas destacam-se em vendas: 3D Systems (27%) e Stratasys (25%). A Stratasys está em crescimento, em oferta de produtos e vendas: segundo seu representante no Brasil, foram vendidos 20 equipamentos *Titan* no mundo em apenas 1 mês após seu lançamento em 2001.

TABELA 3.02 FUNDAÇÃO DOS PRODUTORES DE EQUIPAMENTOS RP

| EMPRESA | PAÍS | ANO DE FUNDAÇÃO | INTRODUÇÃO DE PRODUTOS NO MERCADO* |
|--------------------|----------|-----------------|------------------------------------|
| 3D Systems | USA | 1986 | 1988 |
| Light Sculpting | USA | 1986 | n/a |
| D-MEC | Japão | 1989 | 1989 |
| EOS | Alemanha | 1989 | 1990 |
| CMET | Japão | 1988 | 1990 |
| DuPont SOMOS | USA | 1989 | n/a |
| Quadrax | USA | 1990 | 1990 |
| Cubital | Israel | 1987 | 1991 |
| Mitsui Zosen Corp. | Japão | 1991 | 1991 |
| Sparx AB | Suíça | Desconhecido | 1991 |
| Helisys | USA | 1985 | 1991 |
| Stratasys | USA | 1988 | 1991 |
| Teijin Seiki | Japão | 1991 | 1992 |
| DTM | USA | 1987 | 1992 |

(CONTINUAÇÃO DA TABELA 3.02)

| | | | |
|----------------------|----------|--------------|------|
| Denken Eng. Co. Ltd. | Japão | 1985 | 1993 |
| Soligen | USA | 1991 | 1993 |
| Fockele & Schwarze | Alemanha | 1991 | 1994 |
| Kira Corp. | Japão | 1992 | 1994 |
| Meiko Corp. | Japão | 1991 | 1994 |
| Ushio Inc. | Japão | Desconhecido | 1994 |
| Sanders Prototype | USA | 1994 | 1994 |
| BPM | USA | 1989 | 1995 |
| AAROFLEX | USA | 1994 | 1996 |

OUTRAS EMPRESAS:

Nova Automation: "now known" DTM – Fundada em dezembro de 1987

Quadrax: desenvolveu e vendeu o sistema Mark 1000 até Fevereiro de 1992 quando sua tecnologia foi adquirida pela 3D Systems após um processo de patente que começou em Setembro de 1990.

Teijin Seiki e AAROFLEX licenciaram suas ofertas tecnológicas da DuPont.

* As empresas foram ordenadas pelo ano de introdução de seus produtos no mercado

FONTE: Wohlers Associates

TABELA 3.03 - VENDAS POR SISTEMA E POR EMPRESA

| Processo | Vendas (1997) | Porcentagem | Fabricantes (1997) | | Vendas | Porcentagem |
|---|---------------|-------------|--------------------|---------|--------|-------------|
| | | | Fabricantes | Vendas | | |
| estereolitografia (SL) | 281 un. | 26% | 3D Systems | 165 un. | 16% | japoneses |
| | | | EOS-Stereos | 22 un. | 2% | |
| modelamento por deposição de material fundido (FDM) | 260 un. | 25% | Stratasys | 260 un. | 25% | |
| | | | | | | |
| impressão por jato de tinta (IJP) | 265 un. | 26% | Sanders | 152 un. | 14% | |
| | | | 3D Systems | 113 un. | 11% | |
| fabricação de objetos laminados (LOM) | 98 un. | 9% | Helisys | 76 un. | 7% | |
| | | | Kira | 20 un. | 2% | |
| sinterização seletiva por laser (SLS) | [162 un. 15%] | | Kinergy | >2 un. | - | |
| | | | [Schroff] | 64 un. | 4% | |
| | 75 un. | 7% | DTM | 42 un. | 4% | |
| | | | EOSint | 33 un. | 3% | |

FONTE: KRUTH et al. (1998).

NOTA: Dados de 1997. Os autores apresentam algumas empresas que não serão citadas no trabalho por não existirem equipamentos no Brasil ou por serem similares a outras tecnologias.

No Brasil, a tecnologia chegou em 1993. Há pelo menos 4 representantes de

sistemas diferentes de RP:

Robtec – é a pioneira (desde 1993) na prestação de serviços no Brasil e

representante desde 1998 da *3D Systems* que produz máquinas com tecnologia SL e

MJM; possui mais de 7000 clientes cadastrados, e sedes em São Caetano do Sul (SP),

na Argentina e Uruguai; Possui duas máquinas SLA 250/50, uma SLA 500 e uma

Thermojet. Vendeu um equipamento SLA 250/30 para a Universidade Federal de Santa

Catarina em 1998, um equipamento SLA 3500 para a Mercedes Bens em 2000 e está

vendendo um equipamento SLA 5000 para a Embraer.

Flag – representante da tecnologia SLS, da *DTM Corporation*; da tecnologia

JP5 da *Schroff Development Corporation*; e representante da tecnologia *vacuum casting*

da *Hek*; localiza-se em Diadema (SP);

Sisgraph – representante da tecnologia FDM, da *Stratasys*; localiza-se na

capital de São Paulo. A TABELA 3.04 mostra os equipamentos que foram vendidos por

este representante. Durante o período de 2000 até o 1º semestre de 2001 foram

instalados 7 equipamentos da empresa no Brasil;

McGinty – representante da *Helixys*, tecnologia LOM.

Os representantes comerciais, com exceção da Sisgraph, além de comercializarem os equipamentos, mantêm bîros de prestação de serviço para terceiros. WOHLERS (1998) avaliava que em 1997 havia 8 equipamentos instalados no Brasil, dos quais 4 tinham sido instalados naquele mesmo ano. Equipamentos têm sido adquiridos por grandes empresas, como montadoras de automóveis (em 1998 a GM do Brasil adquiriu um equipamento FDM e em 2000 a Mercedes Bens instalou um

** estava sendo instalado em julho de 2001

* Impressoras tridimensionais

| COMPRADOR | EQUIPAMENTO | ANO |
|---------------------------------------|-----------------|---------|
| Azaleia - RS | FDM 1650 | 1998 |
| CEFFT - PR | FDM 2000 | 1998 |
| GM | FDM 8000 | 1998 |
| GM | <i>Genesys*</i> | 1998 |
| INT - RJ | FDM 1650 | 1999 |
| Parkec - São Carlos | FDM 8000 | 1999 |
| TRW | <i>Genesys*</i> | 2000 |
| Senai - RS | FDM 1650 | 2000 |
| Hospital Sara K. - Brasília | FDM 3000 | 2000 |
| Arno | <i>Prodigy*</i> | 2001 |
| Grendene | FDM 3000 | 2001 |
| Senai - Salvador | FDM 3000 | 2001 ** |
| Gradiente (Manaus) - Instituto Genius | FDM 8000 | 2001 |

TABELA 3.04 EQUIPAMENTOS VENDIDOS PELA SISGRAPH NO BRASIL

equipamento SLA 3500) e fabricantes de eletrodomésticos (Multibrás, por exemplo). De acordo com o artigo de NETTO (1999), uma parcela considerável dos equipamentos vendidos em 1998 foi adquirida por centros de tecnologia ligados a universidades e institutos de pesquisa: NuPES (CEFET – PR), INT – Instituto Nacional de Tecnologia do Rio de Janeiro, Cimjet (Universidade Federal de Santa Catarina) e USP de São Carlos. Estas instituições unem a formação de professores e alunos, estudo da tecnologia e prestação de serviços para pequenas e médias empresas. A USP está fazendo um levantamento de preços para a compra de um desses equipamentos.

Em Santa Catarina, segundo FERREIRA; LAFRATTA (1998), o Pronex, através da criação do Núcleo de Desenvolvimento de Processos e Produtos de Alta Tecnologia, está capacitando laboratórios envolvidos no desenvolvimento de produtos injetados, em pós metálicos (PIM, de *Powder Injection Molding*) ou termoplásticos, desde a concepção até o descarte utilizando tecnologia RP e técnicas de engenharia simultânea.

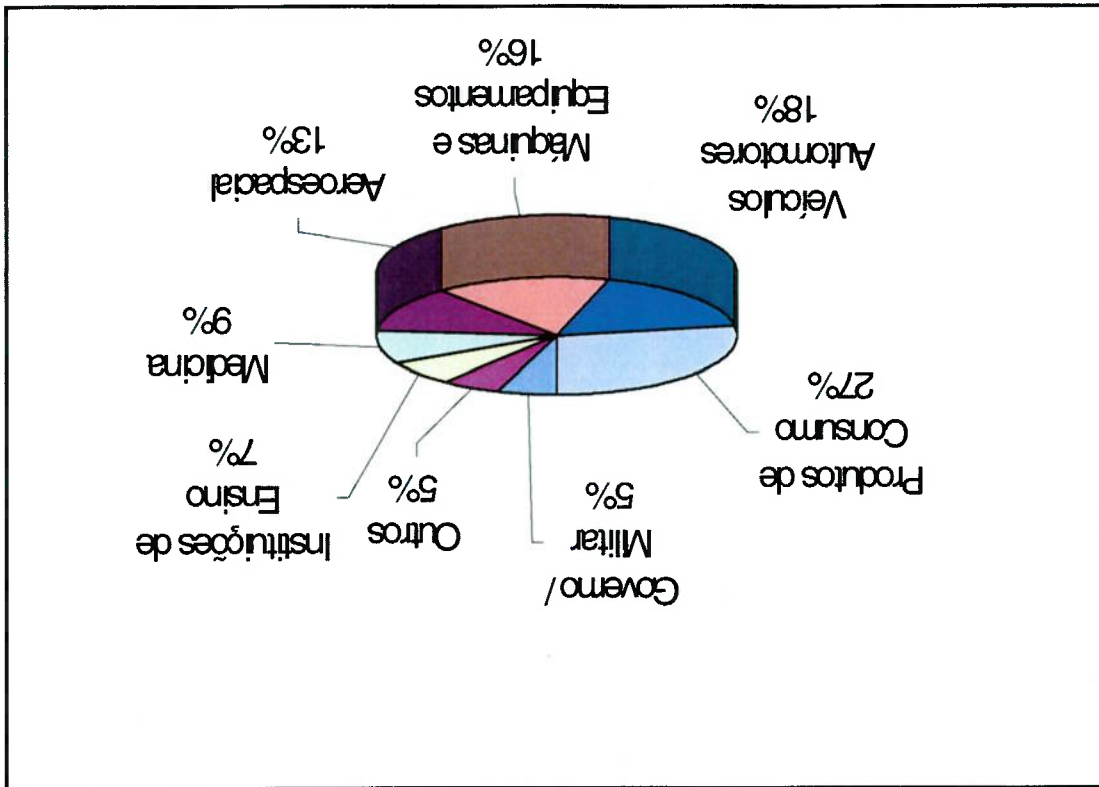
3.4 Aplicações e avanços na última década

Os protótipos rápidos são utilizados de diversas formas e, de acordo com WOHLERS (1998), as aplicações mais comuns estão no campo de comunicação de idéias como mostrado abaixo e é utilizada principalmente nos projetos de produtos de

- consumo (FIGURA 3.01):
- auxílio visual para comunicação, estudo de ferramentas e propostas (31,5%);
 - padrões para ferramentas e para fundição (24,9%);
 - montagem / encaixe (14,6%);
 - protótipos funcionais (13,3%);
 - estudos ergonômicos (5,4%);
 - cotações (4,1%);
 - insertos metálicos diretos (3,3%) e
 - outras (3%)

KRUTH et al. (1998) consideram que os desenvolvimentos observados atualmente nesta área estão concentrados principalmente no aumento da velocidade de produção (na primeira década de existência desta tecnologia conseguiu-se uma redução de dez (10) vezes no tempo de máquina); na busca de novos materiais que se aproximem do material do produto final; na precisão dimensional dos modelos através de melhorias na deposição das camadas; em avanços na utilização da energia a laser; em melhorias na performance dos *softwares* de suporte; e na descoberta de novas aplicações para a tecnologia.

FIGURA 3.01 Empregos industriais da RP (Fonte: *Wohlers Associates*)



3.5 Processos RP

Os sistemas comerciais existentes no mundo após algumas fusões são listados na TABELA 3.05, abaixo:

TABELA 3.05 SISTEMAS COMERCIAIS RP

| Processo | Empresa | Origem |
|--|--|--|
| Stereolithography | 3D Systems, Inc. | Valencia, California |
| Solid Imager | Aeroflex, Inc. | Fairfax, Virginia |
| Stereolithography | | |
| Solid Ground Curing | Cubital | Raanana, Israel |
| Selective Laser Sintering | DTM Corporation | Austin, Texas. Uni-se à 3D Systems, Inc. |
| Paper Lamination | KIRA Corporation | Aichi, Japão. |
| Laminated Object Manufacturing | Cubic Technologies Inc. | Carson, California. |
| Fused Deposition Modeling | Stratasys, Inc. | Eden Prairie, Minnesota. |
| Three dimensional plotting | Solidscap Inc. (ex-Sanders Prototype Inc.) | Merrimack, New Hampshire. |
| Direct Shell Production Casting | Soligen Inc. | Northridge, California. |
| Laser Sintering of metals and plastics | EOS GmbH | Munich, Germany. |
| DeskProto | Delft Spline Systems | Utrecht, The Netherlands. |
| Laser Engineered Net Shaping (LENS) | Optomec Design Company | Albuquerque, New Mexico. |

FONTE: <http://www.cc.utah.edu/>, atualizada em 29 de junho de 2001

Atualmente são mais utilizados os seguintes processos:

3.5.1 Estereolitografia (Stereolithography - SL)

Resinas fotopoliméricas são misturas de monômeros de baixo peso molecular capazes de reagir em cadeia, formando polímeros sólidos com cadeias longas, uma vez. As máquinas SGC da Cubital são um exemplo deste tipo.

método do tipo ponto-por-ponto, iluminando completamente a camada do polímero de resina epóxi. O segundo tipo de máquina utiliza iluminação mascarada ao invés de um máquinas SLA da *3D Systems*, por exemplo, utilizam laser ultravioleta para solidificar processo depende da energia e do comprimento de onda da radiação incidente. As áreas iluminadas reagem quimicamente, solidificando-se. A performance do iluminar uma fina camada superficial de um recipiente cheio de resina fotopolimérica. Mascarada (*Masked lamp*). A primeira utiliza o reflexo de um feixe de laser para fotopolimerização: Cura por laser – estereolitografia (*laser curing*) e Iluminação

Ha principalmente dois tipos comerciais de máquinas que utilizam a

Fotopolimerização:

de fotopolimerização, que é descrito a seguir:

O principal fenômeno de transformação da matéria durante esse processo é o suas principais vantagens são a precisão geométrica e a alta qualidade superficial. com outras tecnologias de fabricação. FERREIRA; LAFRATTA (1998) consideram que também utilizada na obtenção de ferramental para injeção de plásticos e em parceria obtenção de um protótipo em poliuretano feito pelo método de *vacuum casting*. E para protótipos funcionais, servindo de *master* para moldes em silicose para posterior confecção de padrões para fundição. No entanto, cada vez mais, está sendo utilizada checagens de ajuste dos modelos e alguns componentes de túnel de vento etc.) e para a mundo. Apropriada principalmente para modelos conceituais (demonstrações, Pioneira, esta tecnologia é a que possui mais equipamentos instalados no

quando ativados por energia radiante com um comprimento de onda específico. Fotoiniciadores são adicionados para agir como absorvedores eficientes de energia, liberando catalisadores que iniciam o processo de polimerização dos monômeros. As resinas a base de epóxi são atraentes para o uso por sua alta resistência mecânica e baixa contração volumétrica se comparadas às acrílicas. Até 1998 havia 5 processos diferentes de fotopolimerização conhecidos.

Para esses processos a energia específica pode ser descrita como a fotossensibilidade do fotopolímero: isto é, a quantidade de exposição à energia radiante necessária para solidificar uma unidade de resina fotopolimérica. Fotopolímeros com alta energia específica requerem mais energia para solidificar-se. Tal energia depende do limite de transição da resina do estado líquido para o sólido, da profundidade de cura do polímero e da profundidade de penetração.

O tempo de imagem é determinado pela fotossensibilidade da resina, pela potência de iluminação, a área da camada e alguns outros parâmetros constantes.

Para a estereolitografia, $V_{min} = (\pi d^2/4)l$, onde d é o diâmetro do feixe de energia. O modelo "1000 Laser Modeling System" possui feixe com diâmetro de 89µm e espessura de camada de 51µm, produzindo uma resolução de 3152 elementos por mm³, por exemplo.

Descrição do processo:

No espaço de trabalho, uma plataforma é coberta apenas alguns décimos de milímetro ao ser mergulhada em um recipiente cheio de resina fotocurável à base de epóxi ou acrílico. A resina cura nas áreas iluminadas pelo laser ultra-violeta (HeCd ou HeNe) que é guiado por um conjunto de espelhos, desenhando cada seção a partir do modelo computacional. Ao terminar de ser formada a camada, a plataforma desce o

equivalente à espessura de uma nova camada, sendo que a solidificada na etapa anterior fica recoberta por uma película da resina. Um lâmina de varredura nivela e uniformiza a película. O laser solidifica esta nova camada após um tempo previsto para a estabilização da camada antecedente. A operação repete-se até a composição total do objeto (FIGURA 3.02). A plataforma possui orifícios que permitem que a resina não solidificada seja drenada ao erguer-se o objeto no final do processo.

Requer previsão de suportes, construídos pelo próprio equipamento durante a fabricação do objeto: para o sustento de partes do objeto que não possuem sustento natural; para que seja facilmente removível da plataforma; para ancorar o objeto na plataforma, sem perigo que este flutue.

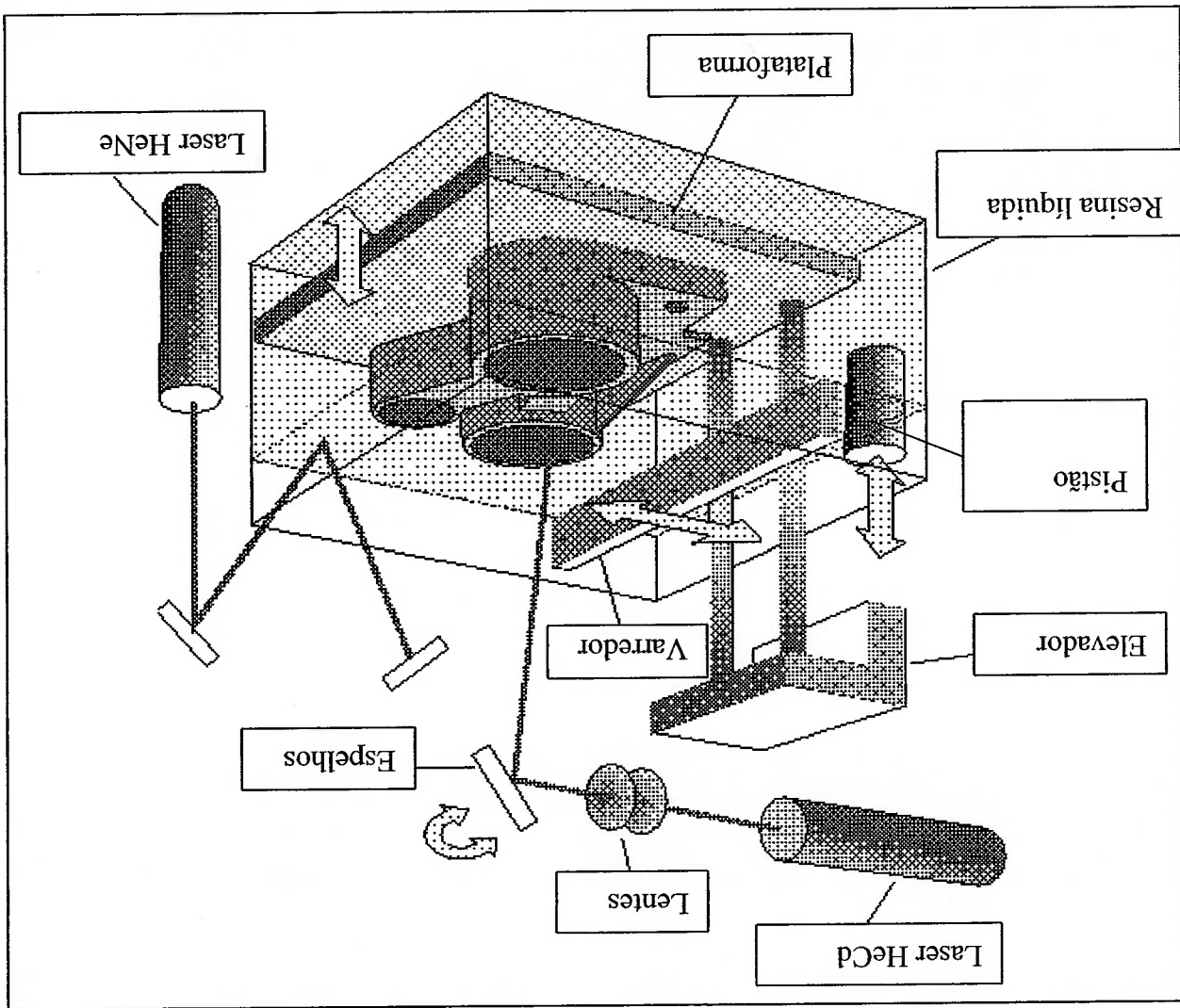
O representante destes equipamentos no Brasil é a Robtec.

3.5.2 Modelamento por deposição de material fundido (*Fused Deposition*

24/08/01)

www.cs.hut.fi/~ado/tp/subsection3_6_1.htm#SECTION00061000000000000000; em

FIGURA 3.02 Esquema de formação de peça por estereolitografia (adaptado de



Os modelos são construídos por deposição de camadas ultrafinas (FIGURA

3.03) - uma sobre a outra - de um material termoplástico semilíquido com características semelhantes ao ABS (*acrylonitrile-butadiene-styrene*) injetado. Este material oferece resistência, tenacidade e durabilidade razoáveis. Além desse termoplástico, o processo utiliza também *nylon* (protótipos para verificação de medidas e controle de projeto); elastômeros; cera para a construção de modelos para o processo *investment casting* (para a produção de peças metálicas); e "ABS" para medicina. Podem ser construídas peças sólidas, aveoladas ou vazadas. Por isso, também é comumente utilizado para a confecção de padrões para a fundição.

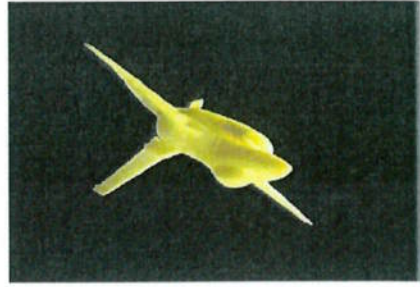
Material fundido é depositado na área de trabalho, percorrendo-se a borda da camada e depois preenchendo seu interior. Áreas não preenchidas são completadas, quando necessário, com material de suporte na mesma espessura. Assim como a estereolitografia, esse processo prevê a necessidade de suportes e o *software* oferece opções ao usuário conforme a posição de produção escolhida.

O tempo de imagem por camada é determinado pela "vazão" do material fundido (extrudado), pela área da camada e por sua espessura.

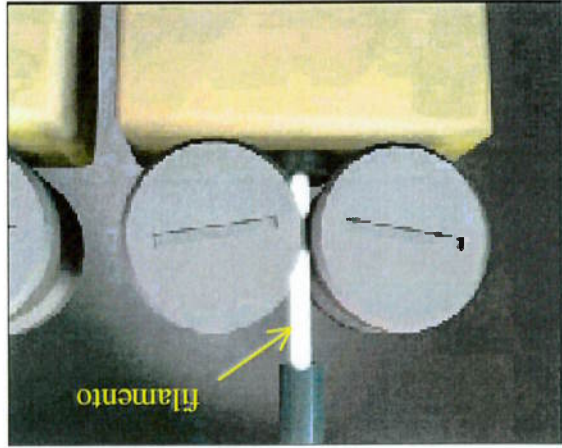
O volume mínimo de resolução é dado por $V_{min} = (\pi d^3/6)$, onde d é o diâmetro do bico de deposição. Os fatores limitantes dessa resolução residem na produção e controle da deposição.

FIGURA 3.03 Esquema de deposição de material (FDM). FONTE: www.stratasys.com

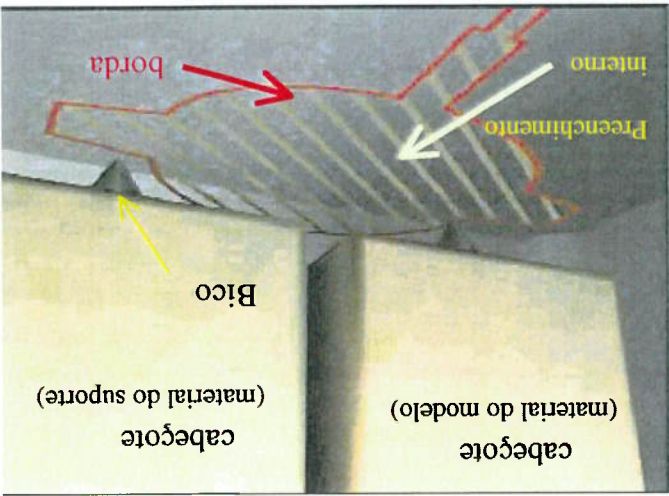
E) objeto final em ABS



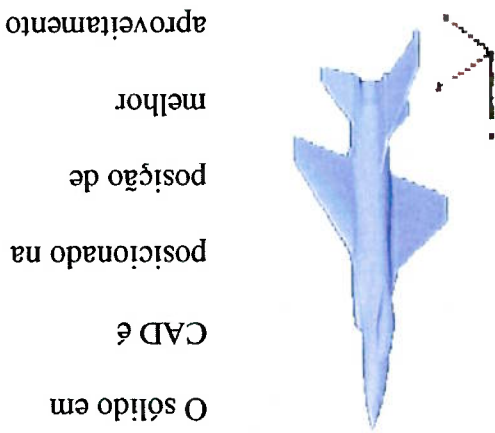
C) filamento de ABS sendo extrudado



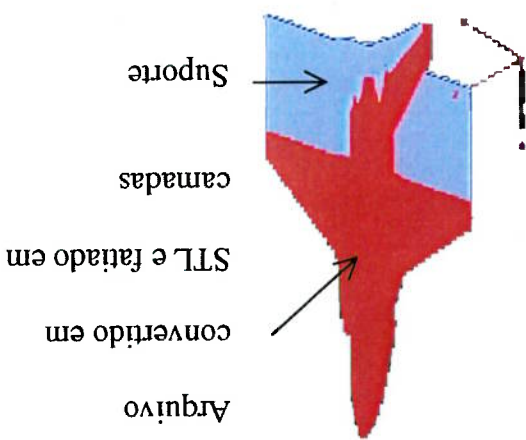
D) deposição de termostático semi-líquido



A) figura de um avião em CAD



B) determinação do suporte necessário



O tamanho dos bicos extrusores – há um para o material do modelo e outro para o material do suporte – limita o tamanho de orifícios, e paredes muito finas não costumam ter sustentação suficiente. Deve-se prever a inclinação de paredes e a curvatura dos objetos antes de optar pela posição de produção do modelo.

A máquina prevê substituição de bicos e variações no modo de preenchimento da camada, no entanto, não é recomendável para peças pequenas ou com muitos detalhes. Dependendo das opções escolhidas, varia-se o tempo de produção do modelo.

O equipamento pode ser utilizado em ambiente de escritório e possui *software* amigável. As peças em cera para fundição têm um bom acabamento superficial permitindo construção de cascas para fundição. O “ABS” é utilizado para verificações de ajuste e de formas geométricas e para modelos de túnel de vento.

No Brasil, o representante desta tecnologia é a Sisgraph Ltda.

3.5.3 Sinterização seletiva por laser (*Selective Laser Sintering* - SLS)

O calor controlado de um feixe de laser de CO₂ infravermelho interage com uma fina camada de pó, aumentando a temperatura até um pouco abaixo do ponto de fusão, resultando na agregação de partículas entre si e com a camada precedente, fazendo com que material em pó seja aderido localmente camada após camada (FIGURA 3.04). O laser infravermelho é preferido devido a sua alta densidade de potência.

A energia de sinterização pode ser considerada como a energia necessária para elevar uma massa de partículas em pó acima de temperatura de transição vítrea

(para o caso dos polímeros). A sinterização requer 300 a 500 vezes mais energia que a

fotopolimerização.

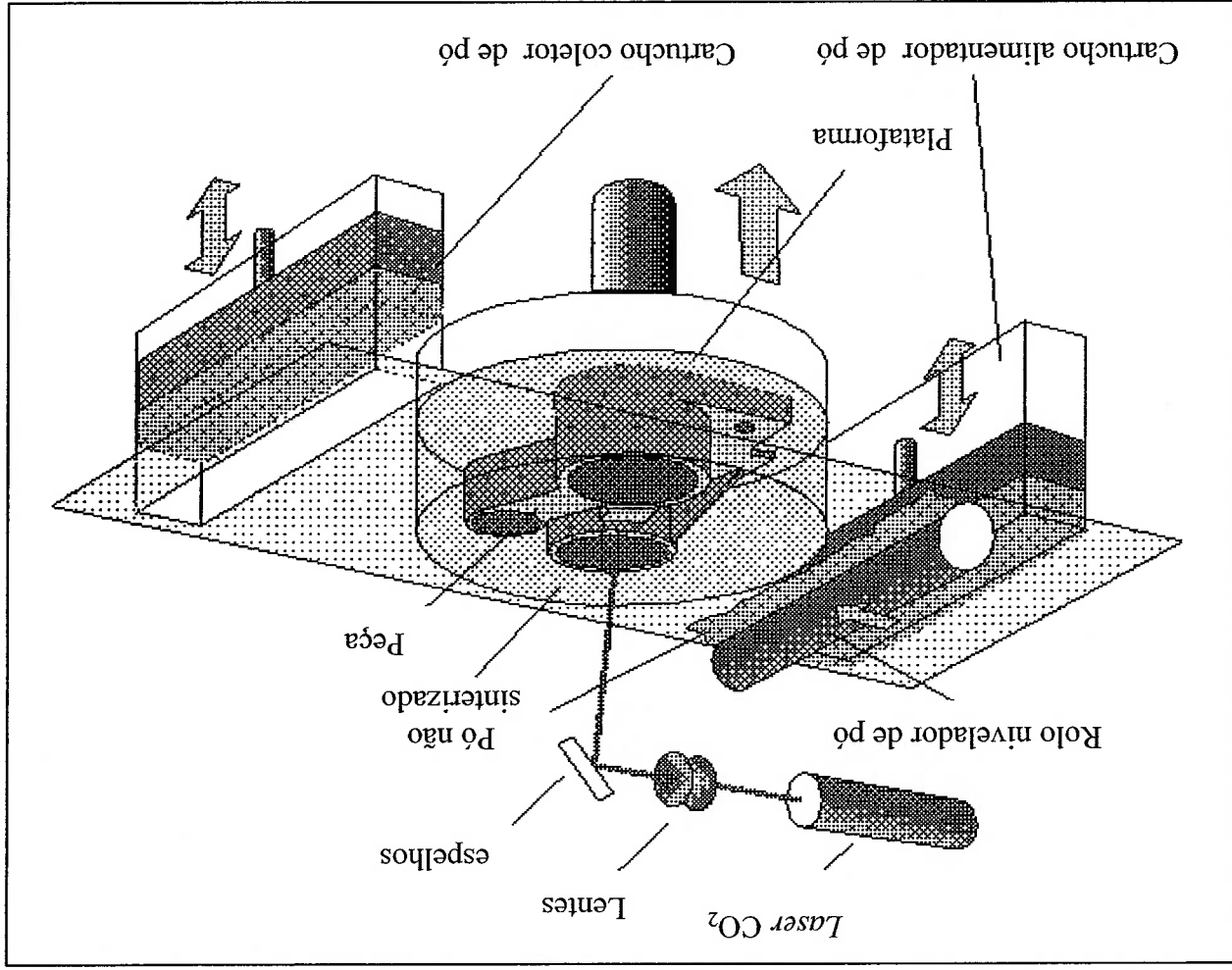
HOCK; KNEISEL (1996) afirmam que poderiam ser obtidos modelos cujas propriedades mecânicas correspondem à 95% das de peças injetadas. No entanto, GOMIDE (2000) afirma que na maioria dos casos, as peças apresentam uma aparência porosa. Em peças metálicas são feitas infiltrações com cobre ou epóxi, na tentativa de reduzir sua porosidade. Além disso, pode-se necessitar algum pós-processamento (polimento, jato de areia, pintura etc.), de acordo com a finalidade do modelo. Comparativamente, a precisão deste processo é menor que a estereolitografia.

Este processo não necessita de suporte, pois o pó não "fundido" permanece ao lado do pó "fundido", sendo também recoberto por nova camada. Deste modo, os "vazios" da peça ficam preenchidos e as partes aéreas da peça permanecem sustentadas. Ao final do processo, o pó é removido com auxílio de jatos de ar (embora na maioria dos casos não seja nem necessário), sendo apenas necessária a existência de orifício para a sua saída.

24/08/01)

www.cs.hut.fi/~ado/rp/subsection3_6_3.html#SECTION00063000000000000000; em

FIGURA 3.04 Esquema de formação de uma peça por sinterização a laser (adaptado de



Este processo permite a produção por método direto de ferramentas para pré-séries de injeção de plásticos, possibilitando que sejam feitos “protótipos” do tipo funcional em tempo bastante reduzido, como será explicado posteriormente. Permite também, a utilização de diversos materiais em pó (fornecidos pelo fabricante), trocando-se apenas os cartuchos que alimentam o processo. No entanto, cada peça só pode ser feita de um único material por enquanto.

Os modelos obtidos são utilizados, por exemplo, para a fabricação de componentes de interiores de veículos, na checagem de ajustes e verificações de projeto. Peças de policarbonato e cera podem servir de padrão, permitindo que sejam fundidos componentes prontos para uso, a partir dos moldes obtidos. Devido à grande diversidade de materiais, esta tecnologia pode ser recomendada para diversas aplicações: modelos conceituais, protótipos funcionais e confecção de padrões para a fundição.

Seu representante no Brasil é a Flag Tecnologia.

3.5.4 Fabricação de objetos laminados (*Laminated Object Manufacturing* -

LOM)

A Fabricação de Objetos Laminados da *Helisys* produz partes sólidas a partir de lâminas de material. Folhas alimentadas a partir de um rolo de um termoplástico adesivo, são cortadas por um laser CO₂ e cada camada é colada sobre a precedente por aplicação de calor e pressão. A área externa à borda da camada e as áreas internas fechadas são cortadas em pequenas seções chamadas “ladrilhos” (*tiles*). Estes “ladrilhos” são removidos facilmente durante pós-processamento.

No caso da fabricação de laminados, a energia específica é composta por três fatores: a capacidade específica de calor, a densidade do papel utilizado e a temperatura de desintegração.

A espessura da camada influencia todos os parâmetros: o tempo de formação da imagem (*t_{imagem}*) é influenciado pela potência do laser inversamente requerido para cortar a camada em toda sua profundidade (espessura). O tempo passivo (*t_{passivo}*) é influenciado pelo número de camadas, que depende da espessura.

Descrição do processo:

Folha de papel adesivo proveniente de uma bobina alimentadora é comprimida por um rolo aquecido, sobre a plataforma da máquina. Esta camada de material é cortada no formato da peça, por um laser CO₂ guiado pelo computador (FIGURA 3.05).

ficam bastante comprometidos pela dificuldade em retirar-se seus miolos. Esta é uma
entanto, deve-se prever a retirada do material a ser destacado da peça: furos pequenos
aquecer demais o papel. Neste processo não é necessária a previsão de suportes, no
Deve-se prever contra possível incêndio, uma vez que o laser pode

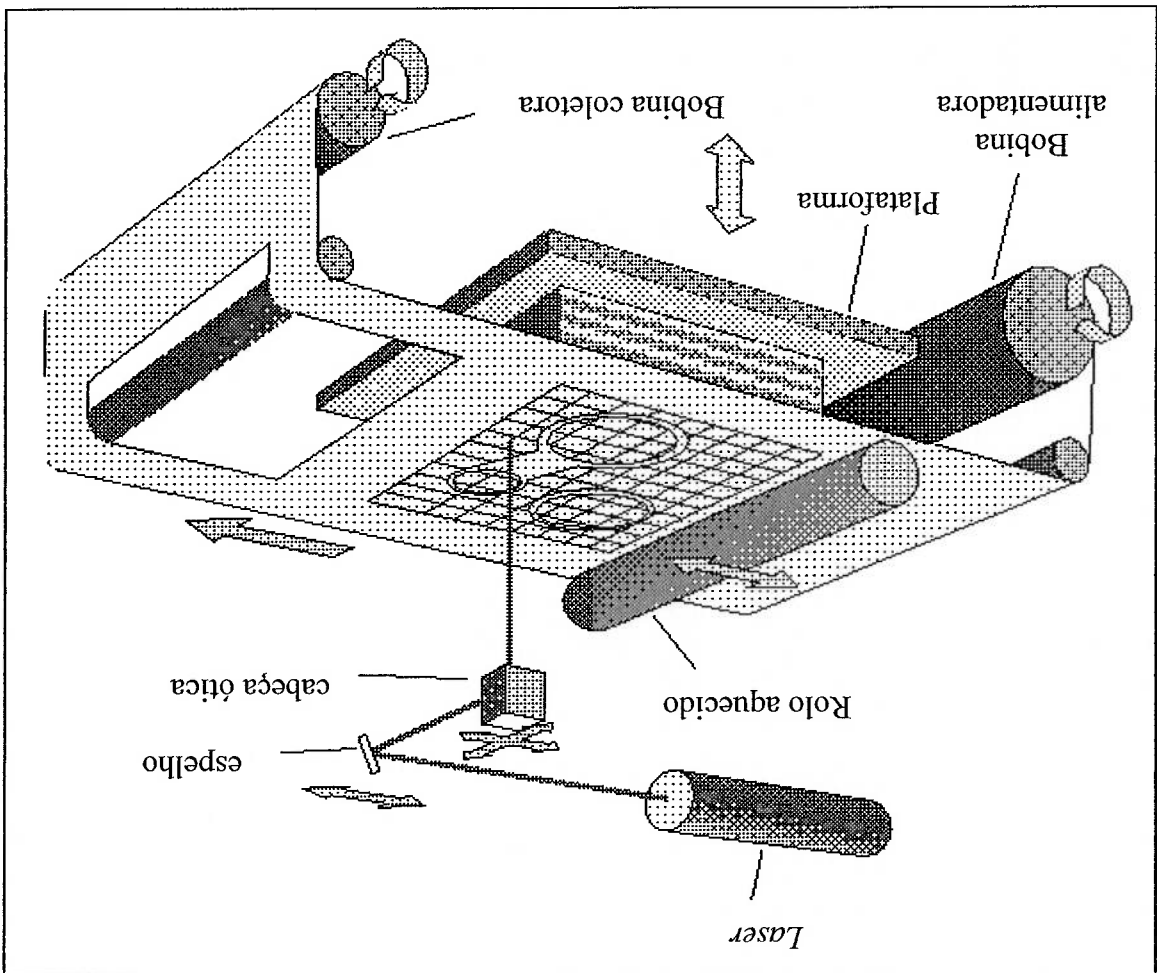
instrumentos (FIGURA 3.06).

não formam parte do objeto são destacadas e removidas manualmente com o auxílio de
camada a camada, até que seja formado o objeto. As partes de papel recortado, mas que
do restante por não se aderirem à plataforma. Repete-se os procedimentos anteriores
A plataforma desce; uma bobina recolhe as bordas do papel que se destacam

24/08/01)

www.cs.hut.fi/~ado/rp/subsection3_6_4.html#SECTION00064000000000000000; em

FIGURA 3.05 Esquema de um objeto sendo formado no processo LOM (adaptado de



limitação apontada por GOMIDE (2000), pois não é possível remover pedaços de papel que não fazem parte do objeto, de objetos que possuem orifícios pequenos ou inclinados ou regiões ocas.

Esta tecnologia é recomendada especialmente para modelos conceituais e confecção de padrões para fundição. Sua textura é semelhante a de um bloco de madeira.

No Brasil é representada pela McGinty.

3.5.5 Outros processos

Vários dos fabricantes de RP estão localizados na Alemanha e no Japão. Na Alemanha *Fockele & Schwarze* oferece máquinas baseadas na tecnologia por estereolitografia. No Japão, *Denken*, *D-MEC*, *CMET*, *Meiko*, *Teijin Seiki* e *Ushio* oferecem máquinas que utilizam uma variação da tecnologia por estereolitografia. Uma outra empresa japonesa, *Kiva Corp.*, fabrica e vende uma máquina de RP que lamina folhas planas de papel para formar objetos.

3.6 Comparação entre os processos RP

Neste item os diferentes processos RP são comparados sobre alguns aspectos que determinam parâmetros de fabricação e a qualidade do produto, bem como a energia necessária para produzi-los.

Apesar de todos os processos serem construídos, por composição de camadas, suas características específicas determinam modos de previsão de fabricação diferentes. Sendo assim, é preciso considerar as seguintes questões:

- posição de construção da peça;
- velocidade vertical: a maioria dos processos percorre toda a superfície, entretanto a composição de laminados recorta somente as bordas e a cura mascarada ilumina toda a superfície instantaneamente;
- previsão de precisão geométrica: peças com furos e superfícies inclinadas podem sair deformadas;
- solicitação mecânica a que estará sujeito: o modelo FDM é bem menos resistente na direção de construção da peça do que nas demais;
- no caso dos laminados é interessante considerar qual a posição que supõe menor perda de material não utilizado, pois dificilmente acaba sendo reaproveitado;
- no processo FDM as paredes delgadas dos objetos terão maior ou menor resistência conforme sua posição de construção.

- necessidade de retirada de suporte: de algum modo, em todos os processos, as partes aéreas da peça são sustentadas. Tanto pó, como papel adesivado, material de suporte ou resina precisam ser retirados do interior da peça ou de reentrâncias da peça sem danificá-la. Para peças simples, alguns processos tornam-se mais rápidos, pois não necessitam da produção adicional de suporte, nem de sua retirada, no entanto, em muitos desses casos é preferível optar por produção manual ao invés da RP.

Em alguns casos onde só é necessária a precisão externa e superficial da

peça, como por exemplo para "casca", é possível prever uma construção mais grosseira

das partes internas.

Considerando-se as avaliações feitas acima, percebe-se que para comparar

os processos é preciso estabelecer alguns parâmetros de comparação, no entanto, em

alguns casos, não serão válidos esses valores e essas comparações.

A seguir são apresentadas tabelas comparativas que procuram estabelecer

parâmetros mais adequados possíveis:

As TABELAS 3.06 e 3.07 apresentam algumas comparações entre os

processos.

TABELA 3.06 VELOCIDADE DE FABRICAÇÃO E RESOLUÇÃO DOS DIVERSOS PROCESSOS RP

| Processo RP | Velocidade de fabricação (m/s) | de Resolução* (elementos por m ³) | |
|---------------------------|--------------------------------|---|------------------|
| | | Atualmente | possível |
| Cura por laser | $5,40.10^5$ | $3.152.10^9$ | $1.330.000.10^9$ |
| Iluminação mascarada | $5,40.10^5$ | 69.10^9 | $97.500.10^9$ |
| Sobreposição de laminados | $1,62.10^5$ | $1.907.10^9$ | $200.000.10^9$ |
| Sinterização a laser | $9,00.10^5$ | 211.10^9 | $244.000.10^9$ |
| Gotejamento/deposição | $5,40.10^5$ | $15.200.10^9$ | $157.000.10^9$ |
| Adesivagem | $4,57-6,84.10^5$ | $1.900.10^9$ | $244.000.10^9$ |

FONTE: baseado em CHUA et al. (1998).

NOTA: * Resolução: $R = 1 / Vr$, onde Vr é o volume elementar mínimo (área mínima x mínima espessura da camada)

TABELA 3.07 ENERGIA DESPENDIDA EM CADA PROCESSO, RUGOSIDADE FINAL DO PROTÓTIPO E NÚMERO DE ETAPAS DE CADA PROCESSO

| Processo RP | Energia específica* (J cm ⁻³) | Rugosidade 10 ⁻⁶ m | Processo | Etapas de |
|---------------------------|--|----------------------------------|----------|-----------|
| Cura por laser | 0,94 | 0,10 | 4 | |
| Illuminação mascarada | 0,94 | 4,22 | 11 | |
| Sobreposição de laminados | 336,00 | não avaliado | 3 | |
| Sinterização a laser | 300,00 | 1,30-3,00 | 4 | |
| Gotejamento/deposição | 0,06 | 1,60-2,00 | 3 | |
| Adesivação | 0,026 | 6,60-15,00 | 4 | |

FONTE: CHUA et al. (1998).

NOTA: * Energia específica: calculada cfr. CHUA et al. (1998)

A TABELA 3.08 apresenta os custos atualizados dos equipamentos RP.

TABELA 3.08 CUSTOS PARA COMPRA DAS MÁQUINAS DE RP

| Processo | Máquina | Fonte: ASHLEY (1995) | Fonte: representantes no Brasil (2001) |
|-------------------|----------------------------------|----------------------|---|
| Estereolitografia | SLA 190 | \$110,000.00 | |
| | SLA 250 / 50 | | \$150,000.00 ³ |
| | Viper-si (3D Systems) | | \$230,000.00 ³ |
| | SLA 500 | \$450,000.00 | |
| | SLA 3500 | | \$450,000.00 ³ |
| | SLA 5000 | | \$650,000.00 ³ |
| | SLA 7000 | | \$1,000,000.00 ³ |
| | Sinterisation 2000 | \$340,000.00 | |
| | Sinterisation 2500 | | ~ \$380,000.00 ¹ |
| | Iluminação mascarada | | \$275,000.00 a |
| FDM | | \$50,000.00 a | \$62,000.00 |
| | Titan (lançamento feito em 2001) | | \$267,000.00 ² |
| | Maxum | | \$402,000.00 ² |
| | FDM 2000 | | \$105,000.00 ² |
| LOM | | \$95,000.00 a | \$180,000.00 |
| Impressora 3D | Genesys | | \$53,000.00 ² |
| | Thermojet | | \$59,000.00 ³ |
| | JP5System | | ~ \$7,000.00 (software) + plotter de corte ¹ |

1 dados fornecidos pela Flag em 2001

2 dados fornecidos pela Sysgraph em 2001

3 dados fornecidos pela Robtec em 2001

Como pode ser observado na tabela acima, o preço entre o modelo mais

simples e o mais sofisticado pode variar em dez (10) vezes. Sendo assim, o comprador

deve avaliar a necessidade de velocidades maiores de produção, de tamanho dos

protótipos e de precisão.

As impressoras 3D possuem os menores preços e por isso este mercado está

em maior ascensão.

A performance deve ser comparada avaliando-se máquinas de preços semelhantes. Este estudo fica recomendado para trabalhos futuros, pois ainda não há um número suficientes de equipamentos instalados no Brasil para realizar esta análise.

TABELA 3.09 VANTAGENS DE CADA PROCESSO RP

| Sistema | Vantagens |
|---------------------------|---|
| Estereolitografia | tecnologia estabelecida, experimentada |
| | velocidade razoável de fabricação de camada |
| | alta resolução |
| | baixa energia específica |
| | possui o melhor acabamento superficial |
| | necessidade de poucas tentativas para se obter o modelo final |
| | fabricação rápida para objetos com alta razão entre volume e superfície |
| | o próprio laminado funciona como estrutura de suporte |
| | baixa tensão interna e distorção |
| | possibilidade de diversos materiais orgânicos e inorgânicos |
| Sobreposição de laminados | possibilidade de múltiplos materiais e cores num mesmo objeto |
| | custo relativamente baixo |
| | materiais baratos e acessíveis |
| | modelos assemelham-se aos modelos populares de madeira e podem ser retrabalhados facilmente |

| | |
|-----------------------|---|
| Sinterização a laser | não requer suporte, a não ser para complexos modelos de cera com saliências |
| | desperdício pequeno de material, que pode ser reutilizado com certo cuidado |
| | grande possibilidade de materiais com propriedades mecânicas melhores que as dos fotopolímeros |
| | material barato e sem cheiro |
| | os modelos de policarbonato podem servir de modelos de sacrifício se tratados com cera |
| Gotejamento/deposição | grande possibilidade de materiais |
| | capacidade de produzir moldes de cerâmica para fundição de metais |
| | estruturas de suporte incluídas automaticamente por outro bico extrusor |
| | baixa energia específica |
| | baixo custo inicial |
| | baixo custo com material |
| | pode ser operada em ambiente de escritório |
| | confiabilidade alta das máquinas |
| | curto tempo de produção para peças finas (no entanto, não podem ser muito finas, pois o acabamento fica comprometido) |

(continuação da TABELA 3.09 - VANTAGENS DE CADA PROCESSO RP)

| | |
|---|--|
| Adesivação | |
| custo baixo de material | |
| desperdício pequeno de material, limitado ao material de suporte | |
| baixa energia específica | |
| possibilidade de múltiplos materiais e cores numa mesma camada e mesmo objeto | |

FONTE: Adaptado de CHUA et al. (1998) e HUBINGFR et al. (1999).

(continuação da TABELA 3.09 - VANTAGENS DE CADA PROCESSO RP)

| | |
|------------------------------|--|
| Sistema | Desvantagens |
| Estereolitografia | processo complexo |
| | requer suporte, determinado através de software |
| | variedade limitada de materiais |
| | necessidade de cuidados com o solvente utilizado para a |
| | limpeza dos modelos, que é perigoso para o meio ambiente |
| | materiais caros |
| | manutenção anual cara |
| Sobreposição de laminados | de necessidade de trabalho manual e de limpeza específica, |
| | principalmente de material de suporte em cavidades internas |
| | alto desperdício de material |
| | fumaça nociva gerada pelo corte do laser |
| Sinterização a laser | possível queima e risco de fogo devido ao calor do laser |
| | alta energia específica |
| | textura superficial grosseira |
| | porosidade do objeto |
| | alguns materiais requerem uma etapa de cura separada |
| | os modelos de cera necessitam de 12 horas de resfriamento na |
| | máquina |
| | os modelos de cera são muito frágeis |
| | novas peças necessitam de curva de aprendizado |
| | manutenção cara |

TABELA 3.10 DESVANTAGENS DE CADA PROCESSO RP

Em termos de velocidade de fabricação a sinterização por laser era na época a mais rápida, pois não requer suporte, possui alta velocidade de varredura do laser, não requer pós-cura e necessita pouco pós-processamento.

A estereolitografia possui a maior possibilidade de resolução, enquanto que na época da avaliação feita pela tabela (1998), a deposição de material fundido era a mais adequada. No entanto, a estereolitografia possui a menor rugosidade superficial, fator importante no caso de produção de padrões para injeção ou fundição.

3.7 Comparação entre as performances de cada sistema

As TABELAS 3.09 e 3.10 acima listam as principais vantagens e desvantagens de cada sistema, segundo uma análise comparativa feita entre diversos autores.

FONTE: Adaptado de CHUA et al. (1998) e HUBINGER et al. (1999).

| | |
|-----------------------|--|
| Adevisação | limitado a materiais de ponto de fusão relativamente baixo |
| | pobre acabamento superficial e aparência granular |
| Gotejamento/deposição | aparência granular ou rugosa, que pode ser suprida com acabamento manual |
| | resolução pobre |
| | pré-aquecimento ou pós-processamento para a remoção de umidade |
| | pobre acabamento superficial e aparência granular |

(continuação da TABELA 3.10: DESVANTAGENS DE CADA PROCESSO RP)

Outros padrões comparativos que devem ser utilizados para a performance, os custos e a confiabilidade são a energia específica e o número de etapas do processo de obtenção do objeto. A tecnologia ideal deve ser a que possui o menor número de etapas e a mínima energia específica. De acordo com esse critério a deposição de material fundido é recomendada.

CHUA et al. (1998) específica com mais detalhe os cálculos de cada um desses padrões comparativos, no entanto, já ocorreram evoluções no setor; cada tipo de tecnologia possui vários modelos de máquinas e, portanto, a avaliação fica restrita aos melhores modelos; e alguns termos de comparação, como a energia específica, possuem parâmetros distintos e de análise complexa.

4 DERIVAÇÕES DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA

4.1 Moldes e ferramentas para a obtenção de modelos em série

Alguns métodos - em sua grande maioria utilizando-se moldes - foram

desenvolvidos para a obtenção de "protótipos". Em muitos casos utiliza-se a RP para o feito dos padrões para a obtenção de moldes que permitam a produção de protótipos em série, garantindo-se uma amostragem maior para os testes. Nestes casos são previstos ângulos de saída e a retração de material para que a peça final possua as dimensões desejadas.

GOMIDE (2000) descreve que as ferramentas podem ser divididas em ferramentas *diretas*, quando o produto da máquina RP é a própria ferramenta; e *indiretas*, quando o modelo RP é utilizado na obtenção da ferramenta através de outro processo. Comenta ainda outra classificação:

- ferramenta "mole" - cuja capacidade média de produção é menor do que 20 peças;
- ferramenta "de transição" - cuja capacidade média de produção é de 20 a 1000 peças;
- ferramenta "dura" - cuja capacidade média de produção é superior a 1000 peças.

A seguir é apresentado um resumo dos métodos de produção de ferramentas com auxílio da RP e no ANEXO B, uma tabela com os principais processos utilizados para cada método

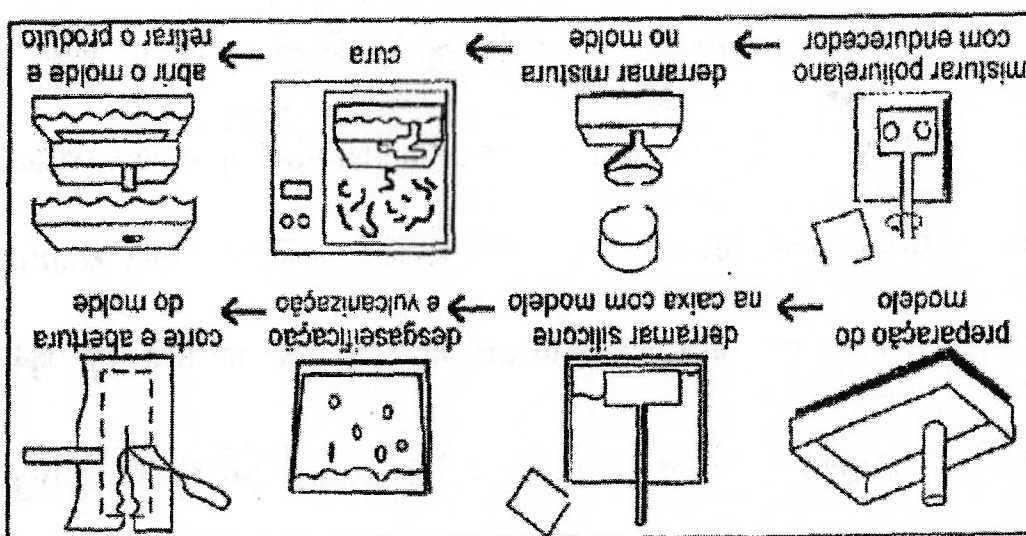
4.1.1 Molde de silicone

A **Vulcanização de Silicone** à temperatura ambiente (RTV – *room-temperature-vulcanizing*), também conhecido como *vacuum casting*, é o processo mais econômico e mais rápido, embora o preço para uma única peça seja relativamente alto. Oferece boas características de ejeção, excelente reprodução de superfícies, durabilidade de 20 a 30 peças por molde, resistência química, baixa contração e boa maneabilidade. Funciona para peças grandes e pequenas. A maneira mais difundida de construir um molde por esse processo inicia-se com a suspensão do modelo (que pode ser um protótipo rápido) dentro de uma caixa de moldagem. O silicone é misturado, desgaseificado e colocado sobre o modelo, envolvendo-o totalmente. O silicone cura e, então, todo o conjunto é retirado da caixa, o molde é separado em duas partes com auxílio de facas e o modelo é retirado. Utilizando-se uretano, preenche-se a cavidade formada (FIGURA 4.01), com ou sem o auxílio de vácuo. Também é possível injetar, sob pressão, uretanos de secagem rápida. Após a cura do material, abre-se o molde e retira-se o protótipo. Embora não seja comum utilizar uretanos para a produção de peças mecânicas, alguns reproduzem a dureza, a resistência à tensão, módulo de elasticidade e resistência à temperatura de termoplásticos utilizados nos métodos de produção comuns no mercado.

Segundo WOHLERS (1998) esta ferramenta permite que sejam feitos moldes invertendo-se o lado para que seja feita a outra metade do molde (FIGURA 4.02). Após a cura do epóxi, retira-se as peças que serviram de sustentação do padrão, coberta é feita em duas etapas: a primeira com epóxi recobrimdo o padrão e a segunda recoberto numa das partes por epóxi para que seja obtido o primeiro lado do molde. Esta dispostas as demais partes do molde (tais como linhas de água, pinos ejetores, etc.), é madeiraira também cortadas na linha de partição do molde) numa base de injeção e, irá resistir às pressões. Então o padrão é preso por suportes (comumente com peças de modelo padrão, no que são colocados insertos metálicos onde se prevê que o epóxi não Semelhante à ferramenta de silicone, a **Ferramenta Epóxi** necessita um

4.1.2 Ferramenta epóxi

FIGURA 4.01 Fabricação de peças com o uso de moldes de silicone (GOMIDE (2000))

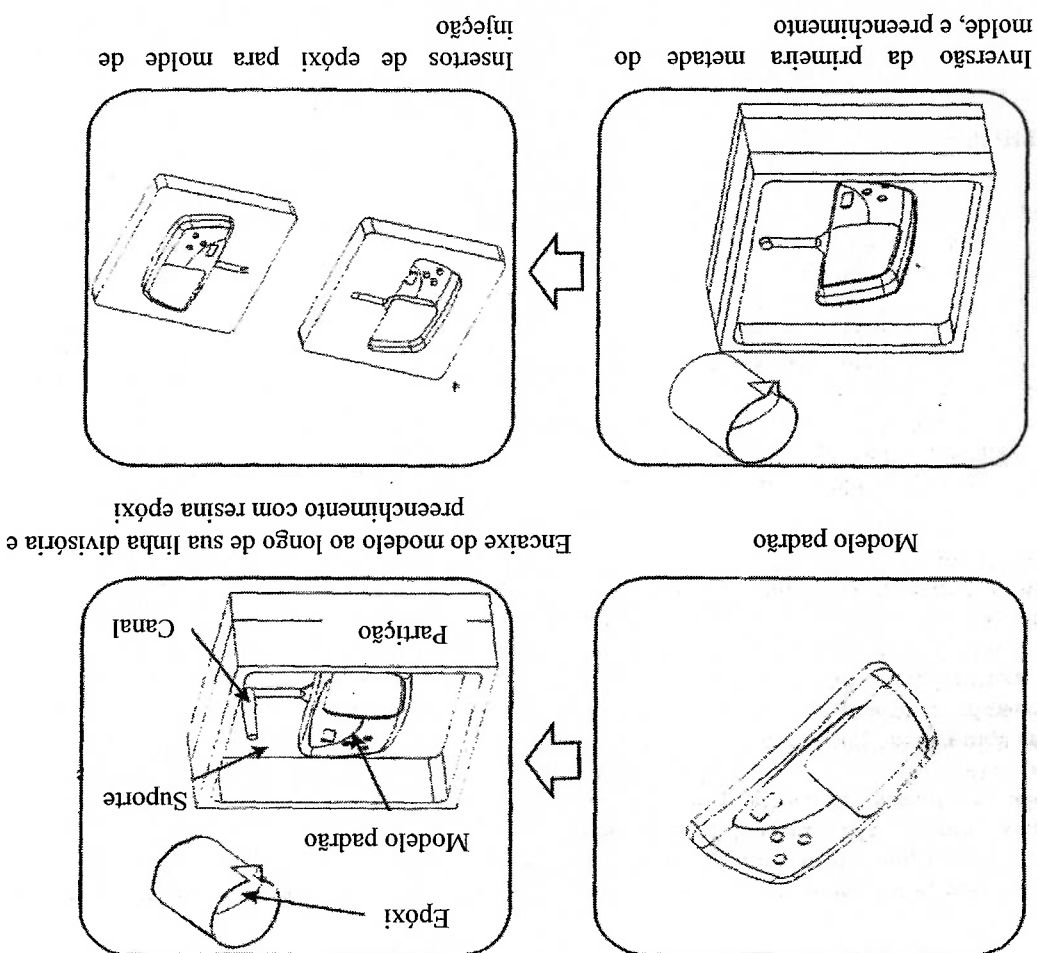


relativamente baratos para peças grandes, pois não utiliza técnicas complexas e nem precisa de equipamento especial, no entanto, possui uma vida útil limitada e geometrias complexas podem requerer muitos insertos de metais, aumentando-se o custo e o tempo. Pode ser utilizada principalmente para termoplásticos. PHAM et al. (1997) alerta que a cura do epóxi é um processo exotérmico e que isso pode danificar o modelo se não se tomam as precauções necessárias.

Já na Pulverização Metálica por Arco Elétrico, conforme FERREIRA; LAFRATTA (1998) e WOHLERS (1998), material metálico (de baixo ponto de fusão, tal como zinco ou algumas ligas) em ponto de fusão por descarga elétrica é pulverizado com ar comprimido (uma camada de 2 a 5 mm) sobre a superfície do modelo fixado sobre uma base emoldurada. Deve estabelecer-se a linha de abertura do molde. Esta camada solidifica-se rapidamente e sobre ela são colocados tubos de cobre para

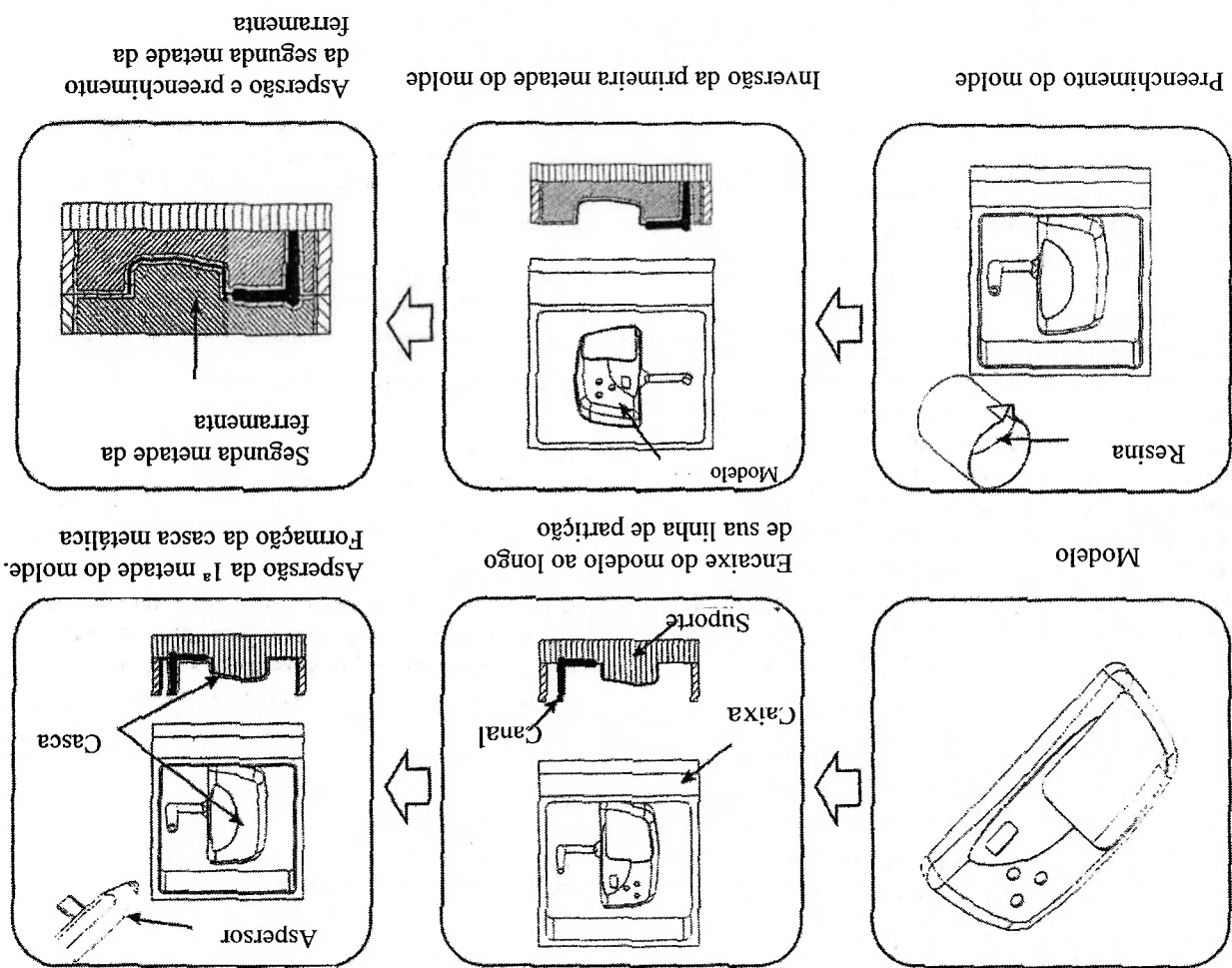
4.1.3 Molde produzido por pulverização metálica

FIGURA 4.02 Ferramental de epóxi (adaptado de PHAM et al. (1997))



refrigeração do molde. Preenche-se a moldura geralmente com um composto de epóxi com partículas de alumínio, que auxiliarão no resfriamento. A moldura e a base são retiradas após o composto estar curado e o processo é repetido para a outra parte do modelo. Estes moldes podem ser, então, fixados em um porta-moldes e montados em uma injetora (FIGURA 4.03). Algumas vantagens desse processo são: a diminuição do tempo de fabricação (de 15 a 20 dias), custos reduzidos (entre 1/3 e 1/2 do custo de uma ferramenta definitiva), a capacidade de produção de 50 a 100 peças injetadas e o modelo para o molde também pode ser feito por RP. Semelhante à ferramenta epóxi, também é recomendada para peças grandes, com a vantagem de não se introduzirem empenamentos devido ao resfriamento. O seu tempo de vida também é maior. É adequado para peças de qualquer dimensões, de baixa ou média complexidade.

FIGURA 4.03 Aspersão metálica (adaptado de PHAM et al. (1997))



4.1.4 Outros processos para obtenção de moldes

Cast Kirksite Tooling – WOHLERS (1998) afirma que este processo é

semelhante ao processo para a ferramenta epóxi, e que permite o feitura de uma ferramenta em material mais durável através da adição no processo de dupla reversão. Permitte, além disso, formatos complexos, mas é menos preciso. É apropriado para peças pequenas e médias.

Há processos de RP mais recentes de produção de protótipos em plástico por ferramentas secundárias:

QuickCast (3D Systems) - FERREIRA; LAFRATTA (1998) descrevem

que, semelhante ao processo de fundição por cera perdida, o processo consiste em queimar um modelo, em resina fotocurável feito por estereolitografia e revestido por cerâmica, em um forno. A casca de cerâmica resultante servirá de molde para que seja vertido o material fundido desejado (alumínio, titânio, ligas de cobre-berílio, aço inoxidável, Iconel, bronzes e aços para moldes de injeção). Após o resfriamento do material, a casca de cerâmica é rompida e a peça resultante submetida às operações de acabamento. No caso específico da indústria de peças de plástico injetadas, a peça resultante é um posição que, montado em um porta-moldes, permite a produção de até centenas de milhares de peças injetadas.

Keltool (3D Systems) – uma peça em silicone, obtida a partir de um molde

feito por estereolitografia, é revestido com uma mistura de pó metálico e aglutinante. Em um forno o aglutinante é eliminado e a peça é sinterizada. A peça sinterizada em aço

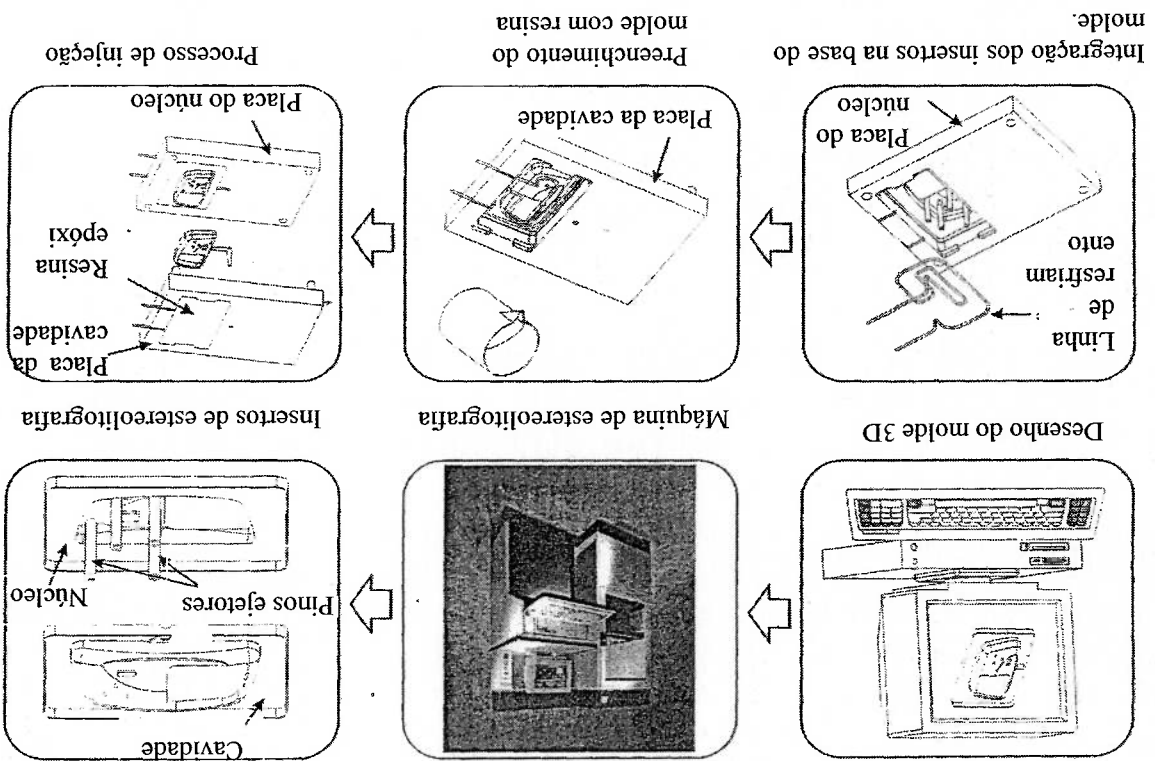
é infiltrada com cobre para preencher os aproximadamente 30% de vazios e resultar uma peça 100% sólida. Segundo FERREIRA; LAFRATTA (1998) e WOHLERS (1998) com este processo é possível construir postigos ou eletrodos. É mais adequado para pequenas ferramentas.

Eletroerosão por penetração com eletrodo de SL – FERREIRA;
LAFRATTA (1998) citam que, embora em fase de desenvolvimento, o processo permite a obtenção de cavidades diretamente em aço. Consiste em cobrir um modelo em estereolitografia com cobre (uma camada de aproximadamente 50 µm), tornando-o um eletrodo para eletroerosão por penetração.

Direct AIM (3D Systems) – postigos em forma de casca das cavidades necessárias, obtidos por estereolitografia de arquivo CAD, são montados em um porta-moldes prevendo-se sua refrigeração (posicionam-se tubos de cobre na parte posterior do postigo) e instalação de ejetores (FIGURA 4.04). Então, são recobertos por um composto de epóxi e partículas de alumínio (que auxiliam no restriamento). Curada a resina, o conjunto é montado em uma injetora e possibilita, conforme FERREIRA; LAFRATTA (1998) e WOHLERS (1998), a obtenção de 20 a 100 peças de termoplástico injetadas. Este processo é relativamente barato para peças pequenas, mas é limitado quanto à complexidade da peça, quanto à durabilidade do molde e quanto à capacidade de resistir às pressões de injeção. A condutividade térmica da resina para estereolitografia é trezentas (300) vezes mais baixa que a da ferramenta convencional, sendo necessário cuidar especialmente da refrigeração do molde durante o processo de injeção.

WOHLERS (1998) descrevem que este processo consiste na produção de um postigo por sinterização de pó metálico (processo SLS) chamado *Rapid Steel* - partículas de aço de baixo carbono que são cobertas com uma fina camada de polímero -. Este postigo é infiltrado com um polímero aglutinante e após tratamento em forno substitui-se o polímero fazendo-se infiltração de cobre por capilaridade. Pode ser montado, então, em um porta-moldes (FIGURA 4.05). Resulta em uma ferramenta completamente densa com 60% de aço e 40% de cobre. O processo produz um molde durável, comparável ao de alumínio, permite geometrias complexas e resiste às condições de injeção.

FIGURA 4.04 Moldes fabricados por *Direct Aim* (adaptado de PHAM et al. (1997))



Entretanto, a precisão do processo varia e a ferramenta requer acabamento e polimento,

consumindo-se tempo.

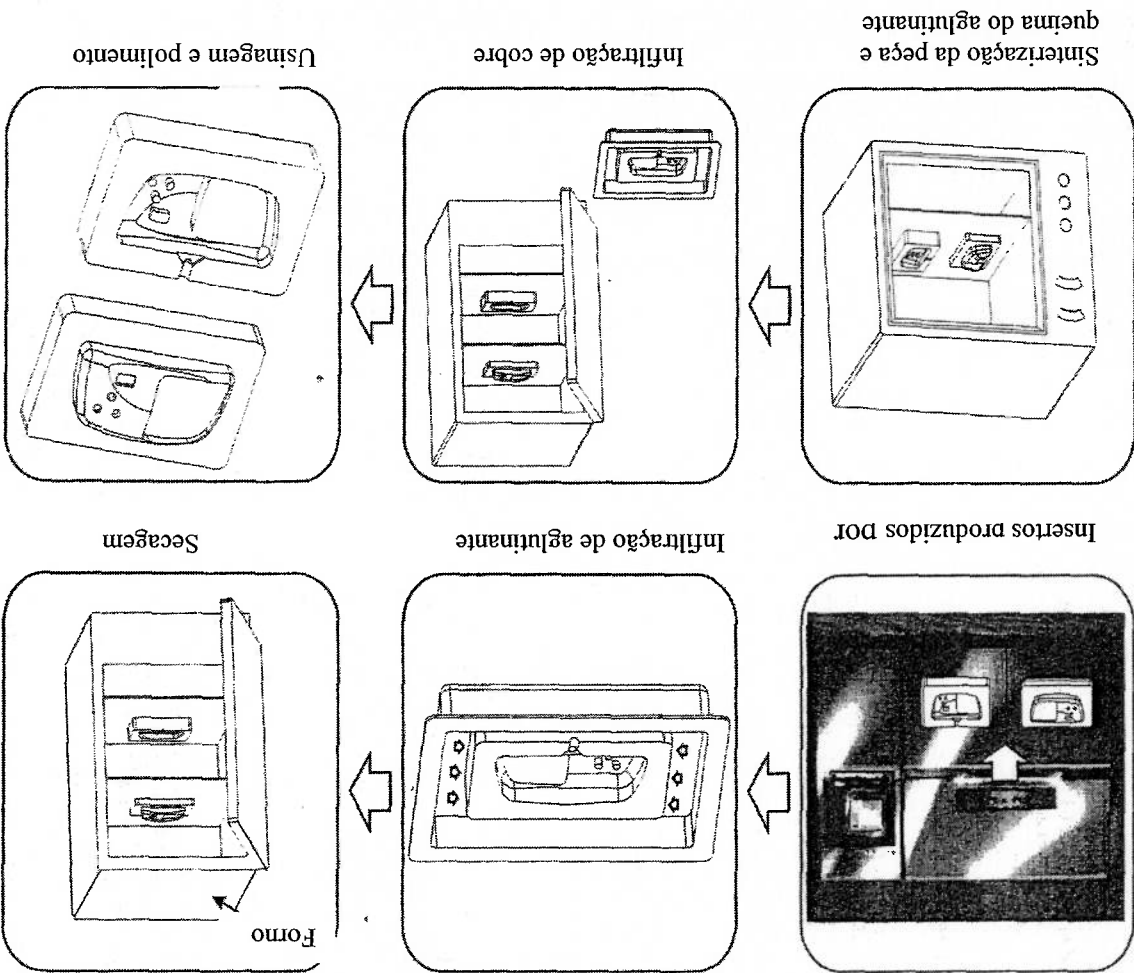


FIGURA 4.05 Processo *Rapid Tool* (adaptado de PHAM et al. (1997))

LENS (*Sandia National Laboratories*) – FERREIRA; LAFRATTA (1998)

afirmam que este processo consiste na fabricação por camadas de um componente metálico completamente denso, que pode ser uma peça ou um posição para injeção.

A seguir são comparados alguns destes processos (TABELA 4.1):

TABELA 4.01 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE FERRAMENTAL

| | Borracha de silicone | Epóxi com inserto metálico | Direct Aim | Spray de metal | Cast Kirksite | Rapid Tool | 3D Keltcol | Machined Aluminum |
|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Tempo de execução (semanas) | 0,5 a 2 | 2 a 4 | 1,5 a 3 | 2 a 4 | 3 a 7 | 3 a 6 | 3 a 6 | 2 a 6 |
| Custo (x \$1.000) | 1 a 5 | 2 a 10 | 2 a 5 | 2 a 15 | 4 a 15 | 4 a 10 | 3,5 a 10 | 4 a 25 |
| Quantidade de peças | 10 a 50 | 50 a 1000 | 10 a 50 | 50 a 1000 | 50 a 1000 | 50 a 10000 | 50 a 1000000 | 50 a 100000 |
| Materials | Uretano, epóxi, ceras | Termo-plásticos | Termo-plásticos | Termo-plásticos | Termo-plásticos | Termo-plásticos | Termo-plásticos | Termo-plásticos |
| Tolerância do molde (mm) | 0,05/25 | 0,05/25 | 0,05/25 | 0,05/25 | 0,08/25 | 0,08/25 | 0,05/25 | 0,025/25 |
| Tolerância do produto (mm) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,0127 | 0,0127 | 0,0127 | 0,05 |

FONTE: WOHLERS (1998)

Observa-se que o preço e o tempo aumentam conforme deseja-se uma ferramenta com maior durabilidade. No entanto, deve-se considerar também, na escolha do método mais conveniente para cada aplicação, o material em que se deseja obter o “protótipo” e a sua repetibilidade, pois se o molde desgastar-se com facilidade os modelos obtidos podem ir perdendo a precisão dimensional.

4.2 Impressoras 3D ou geradores de “pré-modelos”

Foi introduzida recentemente no mercado uma geração nova da tecnologia da máquina de RP que está sendo chamada de Impressão 3D. Esta classe da máquina é utilizada principalmente por engenheiros de projeto para modelos conceituais e para a revisão e aprovações mais rápidas do projeto. As impressoras 3D tornam acessível a tecnologia RP aos grupos de projeto que funcionam com *software* de modelagem do CAD. Estas máquinas apropriadas para escritórios ficam ao lado das estações de trabalho do CAD, das copiadoras do escritório e das máquinas de fax.

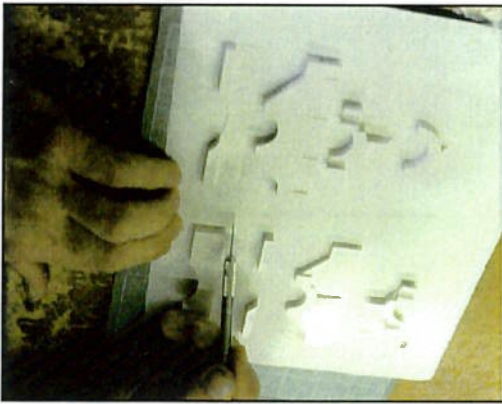
Com as impressoras 3D reduz-se ainda mais o tempo para a obtenção de modelos. Como um exemplo para termo de comparação, a impressão 3D de uma peça, que custaria aproximadamente \$1.100 e que demoraria uma semana ou mais para ser produzida por RP, custaria menos de \$50 e demoraria menos de um dia ou dois para ser feita. As impressoras 3D são projetadas para terem velocidade e facilidade de utilização, deste modo o usuário não precisa estabelecer uma escala de parâmetros da configuração do *software*, nem precisa preparar os materiais. As impressoras 3D que estão disponíveis oferecem um material somente, mas a maioria dos desenhistas estão dispostos a sacrificar a flexibilidade por economias significativas de tempo e de custo. Alguns equipamentos já produzem modelos mais precisos, embora os desenhistas e projetistas busquem com estas máquinas mais rapidamente iterar e avançar o projeto antes de irem para opções mais caras de prototipagem. A vida de uma peça de RP é frequentemente de vários dias ou semanas, mas a vida de uma peça impressa em 3D pode ser somente algumas horas e é também comumente menos precisa. No entanto,

também estas máquinas estão ficando mais refinadas e algumas delas produzem modelos mais duráveis e com maior precisão.

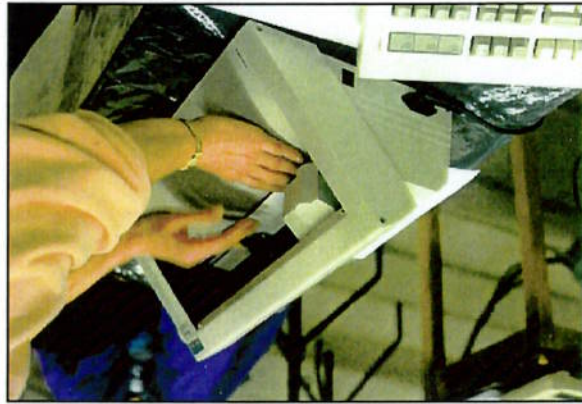
Abaixo são apresentados alguns destes equipamentos comercializados no Brasil e na TABELA 4.02 é feita uma comparação entre algumas destas impressoras:

4.2.1 JP System 5

Produzido pela *Schroff Development Corp.* (SDC) basicamente é semelhante a uma plotter de corte, no entanto, utiliza materiais auto-adesivos. A plotter corta as diversas camadas com furos de guia. Cada camada é colada manualmente numa mesa com pinos de referência seguindo-se a ordem da impressão (FIGURA 4.06).



Montagem manual das camadas



Plotter de corte das folhas de papel

FIGURA 4.06 Corte e montagem do modelo *JP System 5* (FONTE: www.jpssystem5.com/jpssystem5 – julho de 2001)

Os modelos são feitos em questão de horas e são peças simples para protótipos e *mock-ups* visuais, modelos de conceito, padrões simples para fundição em areia e moldes protótipos para *vacuum forming*.

É um sistema de prototipagem rápida de baixo custo que requer um computador pessoal e a *plotter*. O custo do material de um protótipo típico é de menos de R\$ 10,00 (segundo o fornecedor do equipamento). Pode ser utilizado principalmente por escritórios de engenharia, em empresas de *design* e para uso educacional. O representante destes equipamentos, no Brasil, é a *Flag Tecnologia*.

4.2.2 *Thermojet*

A *3D Systems* oferece sua tecnologia de modelagem *Multi Jet Modeling* em um produto chamado *Thermojet*. Este sistema de impressão 3D deposita camadas de material termopolímero usando a tecnologia do jato de tinta. A FIGURA 4.07 mostra como funciona o sistema.

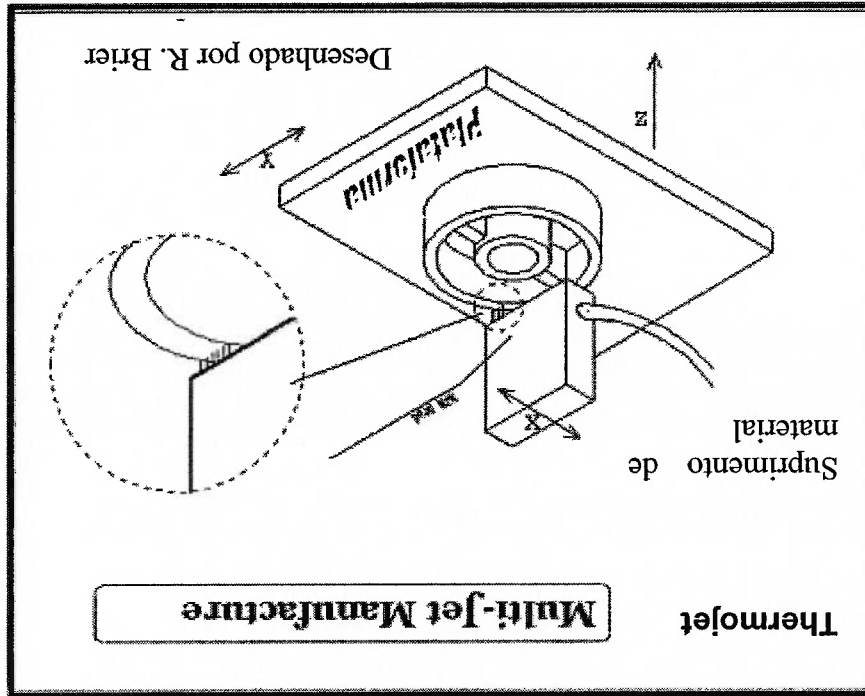


FIGURA 4.07 Esquema de funcionamento do equipamento *Thermojet* (adaptado de

4.2.3 Genesys

É a impressora 3D da *Stratasys*, uma máquina de escritório (FIGURA 4.08) baseada na tecnologia concebida no Centro de Pesquisa Thomas J. Watson da IBM. A máquina cria as peças plásticas usando uma técnica térmica de extrusão similar aos produtos FDM (*Fused Deposition Modeling*) da companhia.



FIGURA 4.08 Foto de uma máquina Genesys (FONTE: www.stratasys.com)

TABELA 4.02 COMPARAÇÃO DOS GERADORES DE “PRÉ-MODELOS”

| | | | |
|--------------|--|------------------------------------|--|
| | <i>Genesys</i> | <i>Thermojet*</i> | <i>JF System 5</i> |
| Fabricante | <i>Stratasys Inc.</i> | <i>3D Systems</i> | <i>Schroff Development Corporation</i> |
| Processo de | Deposição contínua: FDM | “Impressão por jato de | Fabricação de objetos |
| RP | | “Tinta” (<i>multi jet</i> | laminados (<i>plotter</i> de |
| | | <i>modeling</i>): | cut |
| Tamanho do | Até 203 x 203 x 203 | Até 250 x 190 x 200 | Largura útil (de 280 a |
| modelo (mm) | | | 1195)* – única |
| | | | dimensão limitada |
| Material | Cera de fundição de | Cerâmico (<i>Thermojet 88</i> | Papel (adesivo) |
| | precisão, cera para | <i>thermopolymer</i> | e |
| | modelos, polietileno, | <i>Thermojet 2000</i>): preto, | |
| | poliamida, ABS | cinza e neutro | |
| Precisão | Modelo 3D +/- 0,356* | Resolução de 300 dpi. | Depende do operador |
| (mm) | | Precisão de 0,02 a 0,04. | da máquina |
| Espessura da | 0,05 até 0,25 até 0,7 | 0,02 (em 6 passadas). | Depende |
| camada (mm) | | | da |
| Velocidade | 1,01. 10 ⁻¹ m/s (velocidade | ≅ 2,78.10 ⁻⁶ m em “z”/s | Baixa, devido à |
| | de impressão)** | (1 cm/h) | operação manual |
| Preço (FOB) | US\$ 53.000* | US\$ 60.000 | US\$20.000* |

FONTE: baseado em KAUFELD (1998).

NOTA: * dados dos fornecedores ** a velocidade de impressão deve ser multiplicada pelo *t_{imagem}* e pelo n.º de camadas por metro para obter-se a velocidade em “z”.

5 CONCEITO DE PROJETO

5.1 Processo de desenvolvimento de produtos (PDP)

Segundo KAMINSKI (2000): “ O processo de desenvolvimento de produtos pode ser definido como um conjunto de atividades envolvendo quase todos os departamentos da empresa, que tem como objetivo a transformação de necessidades de mercado em produtos ou serviços economicamente viáveis”.

Cada empresa costuma adotar ou desenvolver a sua metodologia de projeto, de acordo com a “filosofia” da empresa. Tais metodologias de projeto auxiliam os projetistas a conduzirem o problema de projeto passo-a-passo, contribuindo para que se diminuam os erros por esquecimentos e falta de diretrizes no desenvolvimento dos mesmos.

Segundo MARIBONDO et al. (2000) as atividades inerentes à cultura adquirida por cada idealizador de metodologias de projeto ao longo de sua vida influenciam no modo de desenvolvê-las e apresentá-las.

A seguir são apresentadas algumas metodologias de projeto. A primeira é retirada de um livro -BAZZO; PEREIRA (1997) - para estudantes dos primeiros anos de engenharia, elaborado de modo didático e simples, mas de acordo com referências bastante consolidadas, como por exemplo ASIMOW (1968) e DIETER (1983). Já uma segunda metodologia é obtida de um artigo científico atual: FERREIRA; MIGUEL (1999), que analisam uma metodologia de projeto visando-se a implementação dos

conceitos da qualidade total. Por fim, segue-se a metodologia apresentada por ASIMOW (1968) e seguida em KAMINSKI (2000). Adotando-se os pontos comuns destes três trabalhos, estabelecem-se as fases de um processo que servirão como base para determinação dos modelos adequados para serem empregados em cada etapa em um projeto.

5.1.1 Metodologia de projeto apresentada por BAZZO; PEREIRA (1997)

Esta metodologia apresenta o seguinte seqüenciamento a ser realizado durante o processo de projeto:

1. Identificação de uma necessidade

Deve-se descobrir ou verificar uma insatisfação atual, que pode ser reduzir custos, aumentar a confiabilidade de sistemas, aumentar o desempenho de sistemas ou satisfazer o impulso consumidor.

2. Definição do problema

Nesta etapa deve-se estabelecer os dados iniciais do problema e as características finais do sistema; o problema é mais específico que a necessidade que é mais geral e abrangente.

O diagrama abaixo (FIGURA 5.01) demonstra um método muito utilizado – método da “caixa-preta” -, no que se procura definir os dados iniciais e finais do sistema.

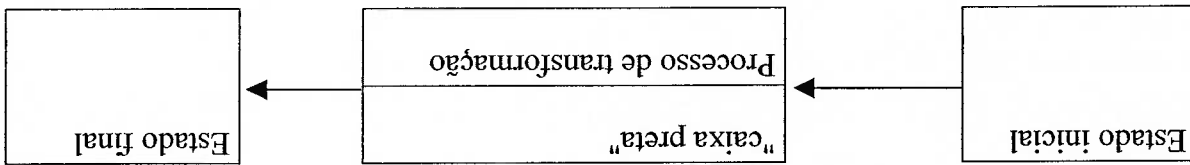


FIGURA 5.01 Método da “caixa-preta”

3. Coleta de informações

Nesta etapa faz-se uma busca das informações necessárias para se resolver o problema, tais como:

Dados de entrada e de saída: é feito um levantamento dos parâmetros que se

têm antes e após a transformação desejada, bem como das suas possíveis variações;

Condiçõantes de entrada e saída: especifica-se os valores que podem

assumir cada uma das variáveis de entrada e de saída, tais como peso, volume, formato;

Crítérios: estabelece-se a preferência a ser aplicada na avaliação das

soluções (por exemplo, critério de segurança);

Utilização: estima-se com maior precisão possível qual a taxa de utilização

(vida útil, responsabilidade, utilização “propriamente dita”). Isto deve ser feito porque

quanto maior essa taxa, maior é o custo.

Volume de produção: este item exerce forte influência na escolha do sistema

de fabricação.

5. Avaliação do projeto

A criatividade na concepção é uma característica de grande valor e será mais detalhada posteriormente. É importante que sejam buscadas idéias simples porque são mais fáceis de se produzir, mais fáceis de usar e mais inteligíveis (a funcionalidade pode ser percebida, o que inspira maior confiança).

(analítico, experimental).

A partir desta fase são especificados os elementos, mecanismos, processos, configurações do produto final que satisfaçam a necessidade identificada através de um projeto preliminar. Em muitos casos envolve a formulação de um modelo

4. Concepção da solução

Como os processos de projeto são dinâmicos e recorre-se às fases anteriores para se refinar o projeto, o erro é encarado também como mais uma fonte de dados.

seguintes fontes de dados:

- livros textos;
- artigos científicos;
- catálogos de fabricantes;
- patentes, manuais e literatura técnica;
- discussões com especialistas;

A busca destas informações, além de depender da intuição e do acúmulo de conhecimentos e experiências do projetista, normalmente é feita através de consultas às

É a fase de julgamento (análise completa) do projeto. Nela são feitos os cálculos detalhados do desempenho, os testes de simulação com modelos experimentais (em escala) ou de protótipos em tamanho real. Ao longo das iterações (FIGURA 5.02) podem ser feitos refinamentos no projeto, buscando-se a otimização (desempenho mais eficiente; busca do mínimo custo, mínimo peso). A otimização é um processo de maturação realizado ao se percorrer novamente as fases anteriores.

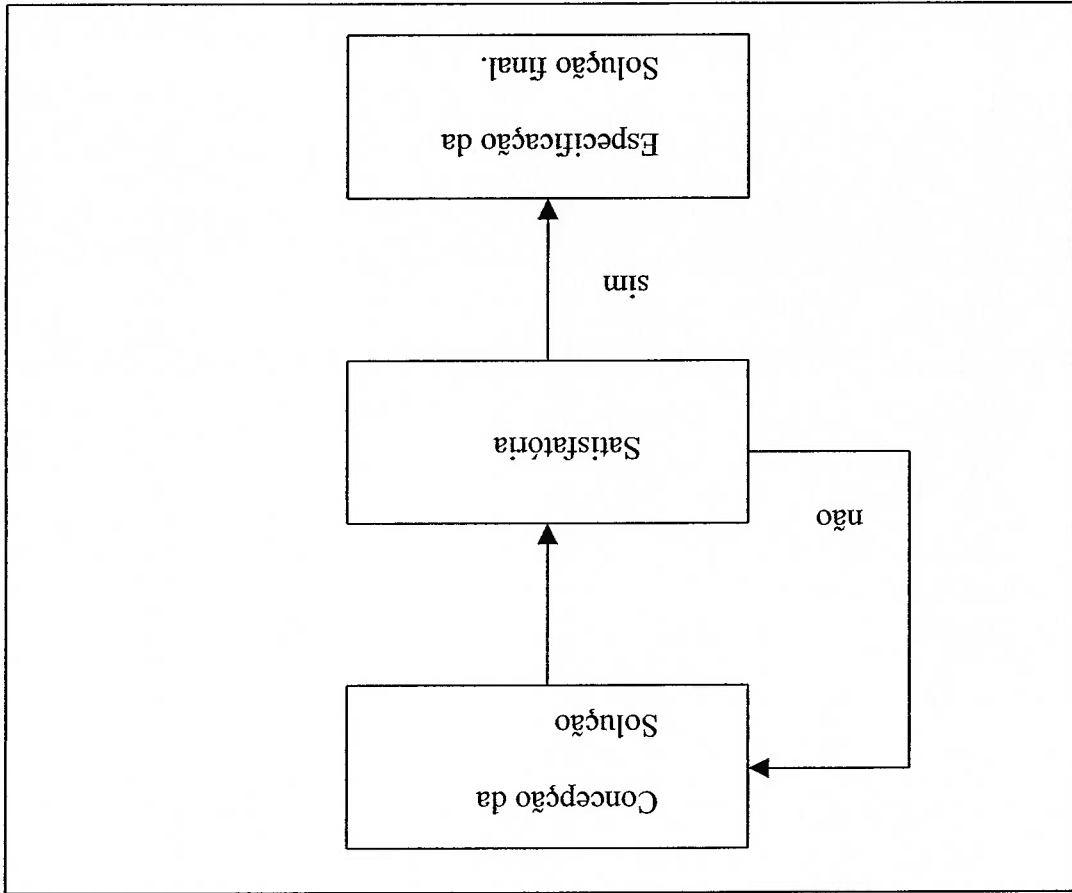


FIGURA 5.02 Fluxograma do processo iterativo

6. Especificação da solução final

Estando aprovadas a viabilidade e exequidade, deve-se partir para os

detalhamentos (especificações).

Prepara-se o memorial descritivo (descrição detalhada de suas partes

constituintes) com os seguintes itens:

— objetivos, funções e localização de cada uma das partes componentes do projeto;

— características básicas da solução final, informando as propriedades requeridas

para os materiais especificados;

— indicação dos valores previstos para os parâmetros e variáveis envolvidas ,

fazendo referência às particularidades que deverão ser observadas no momento da

recepção de material e componentes;

— detalhes construtivos e operacionais;

— desenhos detalhados de componentes, subsistemas e sistemas.

7. Comunicação do projeto

Consiste em relatórios técnicos, esquemas detalhados, listagens de

programas de computador e modelos icônicos.

Costuma conter:

— memorial descritivo;

— memorial de cálculo;

— lista de materiais;

— cronogramas;

— organograma do projeto;

— informações gerais.

O projetista e a equipe de engenharia durante o processo do projeto devem

projetar considerando:

- processo de produção que será utilizado (que ferramentas e equipamentos serão utilizados, etapas e modos de montagem, etc.);
- a distribuição do produto (como será a embalagem, a armazenagem, promoção e distribuição);
- consumo (como será feita a manutenção, o produto é seguro para quem o opera, estética, vida útil, economia de operação, facilidade de operação, conforto, etc.);
- a retirada do produto do mercado (por obsolescência ou término da vida útil).
Exemplo: "abandonado" de material radioativo.

5.1.2 Metodologia de projeto apresentada por FERREIRA; MIGUEL

(1999)

Baseiam o planejamento de projeto nas normas de qualidade total para o

produto e adotam o seguinte processo:

Fase 1: Pré-desenvolvimento

Compreende a adequação entre o processo produtivo e o produto final, que resultará deste processo. Os dados devem ser disponibilizados para todos os envolvidos e devem ser confiáveis. É uma fase de preparação e compreende duas etapas:

1. Coleta de informações

É feito um levantamento de todos os requisitos do projeto que afetarão o processo produtivo e todas as exigências do produto e do processo, tais como material de fabricação, dimensões, tolerâncias etc. O levantamento destes dados deve ser feito

através de metodologias de pesquisa acompanhadas da observação dos documentos gerados durante o projeto do produto.

2. Tratamento e apresentação das informações

As informações devem ser apresentadas, então, de forma simples e organizada, proporcionando facilidade de visualização, para que possam servir como base para a tomada das decisões necessárias para as próximas etapas. Isto possibilita que todos integrantes do projeto tenham uma visão geral do trabalho antes de iniciá-lo, e também evita perdas de tempo posteriores. Alguns dados podem ser convertidos em tabelas ou gráficos, outros em listas de informações de fácil consulta.

Fase 2 - Desenvolvimento

Compreende desde as atividades iniciais de previsão do processo até as fases conclusivas nas que são gerados documentos, tais como desenhos, roteiro de fabricação, sequência de operações, *layout*, controles necessários, etc.

A fase do desenvolvimento divide-se em quatro etapas:

3. Concepção

Procura-se intuitivamente, utilizando-se de processos de criatividade (como por exemplo um *brainstorming*), gerar o maior número possível de idéias. Um grupo multifuncional entrosado, envolvendo pessoas com conhecimentos diversificados e, se possível, de áreas diferentes, deve discutir a possibilidade de realizar o objetivo proposto.

4. Definição

Passa-se a seguir à utilização de métodos racionais para analisar, selecionar e priorizar as soluções mais viáveis. Confrontam-se as soluções com as restrições apresentadas e verifica-se a viabilidade de serem colocadas em prática.

Formaliza-se, então, o planejamento do processo, baseando-se, tanto nas idéias obtidas na fase anterior, quanto nas restrições oferecidas para colocá-las em prática. Determinam-se as metas e objetivos do processo, faz-se a seleção dos meios adequados para produzir, elaboram-se os planos e seqüências de operação, *layout* e traça-se o perfil desejado das pessoas envolvidas no processo produtivo.

5. Elaboração

A última etapa desta fase é o detalhamento do processo, para que ele possa ser implementado. Nesta etapa, define-se a seqüência de execução para implementação, o organismo necessário, as responsabilidades das pessoas envolvidas, os prazos para realização de cada etapa, o prazo final, etc.

Fase 3 - Pós - Desenvolvimento

Compreende 4 etapas que envolvem a preparação do trabalho de montagem do processo, a sua execução e monitoramento:

7. Comunicação

Todos os envolvidos direta ou indiretamente devem ser informados sobre todos os itens do projeto: finalidade do processo, seqüência de implementação, prazos, organismos, responsabilidades, etc.

8. Treinamento

Para que a implementação seja o mais fiel possível ao que foi planejado, as pessoas diretamente envolvidas devem ser treinadas. É importante que, antes de iniciado o processo, seja feito um levantamento do nível de conhecimento dos colaboradores, e que se complemente alguma lacuna verificada entre o conhecimento prévio de cada um e o conhecimento necessário.

9. Implementação

É a etapa da montagem do processo produtivo, ou seja, nela o

desenvolvimento sai do papel para a realidade.

10. Acompanhamento

É uma etapa concomitante com a anterior e serve para verificar se não

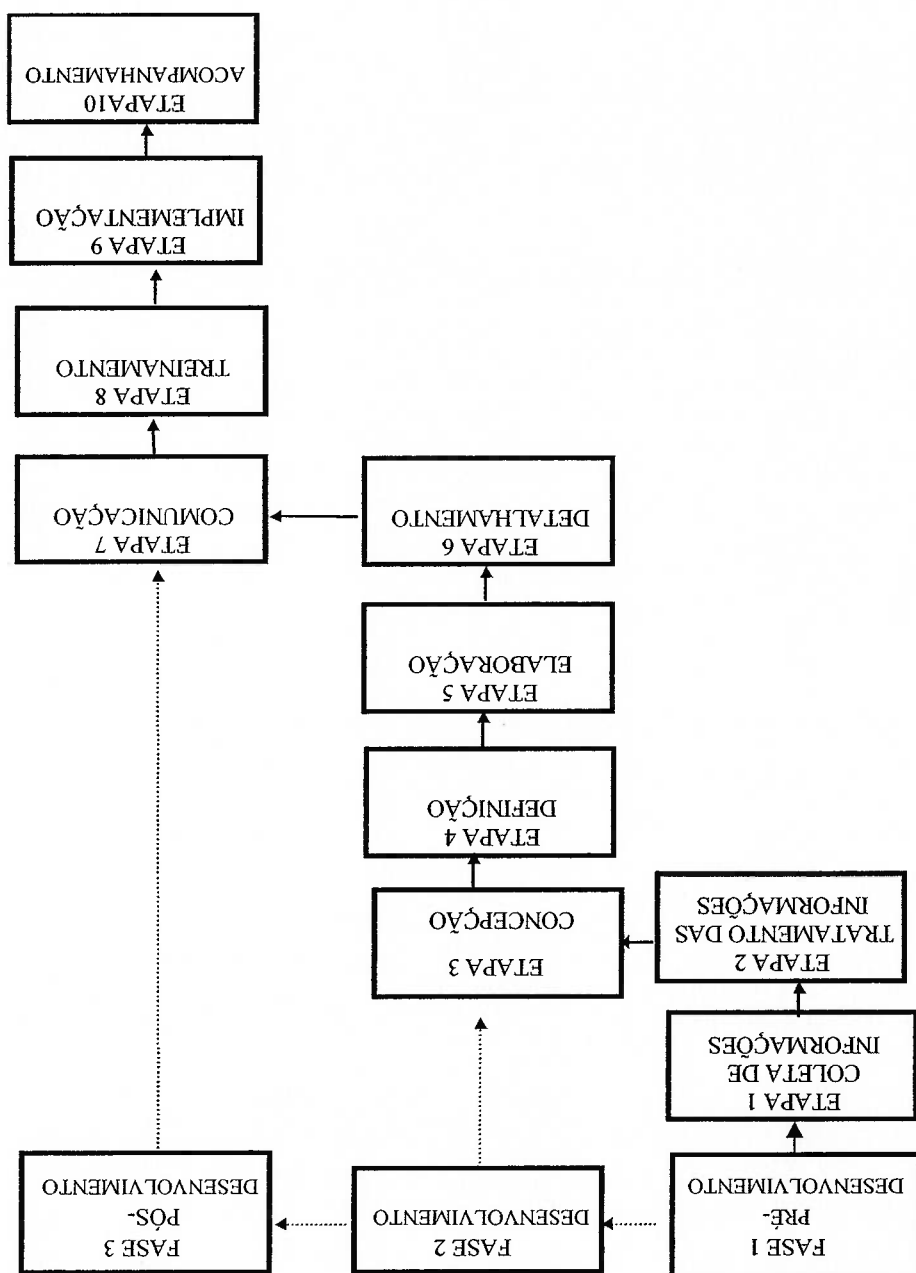
existem desvios entre o planejado e o que está sendo executado. Caso existam, estes

deverão ser corrigidos.

A figura acima (FIGURA 5.03) esquematiza as etapas apresentadas por

MIGUEL (1999)

FIGURA 5.03 Etapas de um processo de projeto apresentadas por FERRREIRA;



A meta de um projeto preliminar é estabelecer qual das alternativas propostas na fase inicial apresenta a melhor concepção para o projeto. Deve ser escolhida uma única solução através de uma análise ainda superficial, como por exemplo, através de uma matriz de decisão, analisando-se suas vantagens e

2. Projeto básico ou preliminar:

Nesta primeira fase deve-se obter um conjunto de soluções plausíveis para a necessidade do projeto. Deve-se verificar sua viabilidade técnica, econômica e financeira. Um primeiro passo é determinar a existência e natureza da necessidade admitida inicialmente. Deve-se ainda definir esta necessidade técnica e quantitativamente da forma mais perfeita possível. Tal estudo deve indicar qual é o problema a ser estudado; deve indicar se podem ser encontradas soluções úteis. É necessário, posteriormente, especificar as exigências decorrentes das necessidades: características funcionais, operacionais e construtivas; limitações e critérios de projeto, determinando-se as especificações técnicas do produto.

1. Estudo de viabilidade ou exequibilidade:

Segundo ASIMOW (1968) independentemente das características individuais de cada produto, é possível obter-se uma estrutura organizativa comum. Embora o desenvolvimento seja cíclico poderiam ser definidas sete fases sequenciais:

5.1.3 Metodologia de projeto apresentada por ASIMOW (1968)

possui um *status* provisório. Até o início desta fase, as mudanças não supõe ainda um *layout* padrão (no caso de utilizar-se RP, pode-se obter um modelo padrão), mas que projeto preliminar até a especificação completa do produto obtendo-se como resultado. Após a decisão se o projeto deve ou não continuar, procura-se desenvolver o

3. Projeto Executivo:

Durante esta fase deve-se obter a definição completa apenas das características principais do produto. A forma de apresentação dos resultados são relatórios descritivos, memorial de cálculo, protótipos, desenhos de conjunto e listas de materiais e componentes dos itens principais.

- comportamento do produto ao longo do tempo.
- do produto;
- a influência dos diversos fatores internos e externos sobre o desempenho funcional
- tolerâncias e material do produto;
- as características básicas dos componentes;
- campo de variações dos parâmetros críticos de projeto (mais importante);
- modelos físicos ou matemáticos a fim de estabelecer:

A partir dessa escolha são feitos estudos e ensaios utilizando-se desenhos e aceita para exames mais detalhados.

outras ou é superior a todas as outras. A solução “sobrevivente” é experimentalmente ordem de grandeza, até que a evidência indique que uma delas é inferior a algumas desvantagens. Cada uma das soluções em alternativa fica sujeita a uma análise de

grandes perdas financeiras, no entanto, ao seu término o produto começa a ser testado para que seja então produzido e as despesas são cada vez maiores.

4. Planejamento da produção/execução:

É o planejamento para a fabricação do produto. Deve resultar no planejamento para se implantar a produção, envolvendo-se projetos de ferramentas e engenharia de produção. Deve-se prever as operações que serão realizadas em cada componente e os dispositivos necessários para sua execução, bem como a montagem de cada peça dos sistemas e subsistemas. Determinam-se os fornecedores de matéria-prima e em algum caso instalação de equipamento especial. Planeja-se a produção e o controle da qualidade. Preve-se os funcionários que executarão o projeto e como se procederá o fluxo das informações. Os custos nesta fase aumentam muito devido à necessidade de se construir protótipos e de se executarem ensaios e testes.

5. Planejamento da disponibilização ao cliente ou distribuição:

O objetivo desta fase é planejar uma maneira conveniente de distribuir o produto, de como fazer o produto chegar ao cliente do modo mais adequado. Alguns itens a serem considerados podem ser citados:

- projeto da embalagem;
- logística;
- lançamento do produto.

6. Planejamento do consumo ou utilização do produto:

A maneira como o consumidor utilizará o produto tem influência determinante no projeto. Pode-se considerar as seguintes características:

- facilidade de manutenção (se pertinente);
- confiabilidade adequada;
- segurança de operação;
- interação homem-produto;
- aparência estética;

7. Planejamento do abandono do produto ou da retirada do

mercado:

Os produtos costumam ser substituídos por deterioração física (final da vida útil, desgaste, quebra) ou obsolescência (técnica ou não técnica). O projetista, então, deve:

- utilizar a tecnologia adequada para diminuir a velocidade de obsolescência técnica;
- procurar que a vida útil (durabilidade) coincida com a utilização do produto;
- projetar para vários níveis de utilização;

5.2 Considerações sobre algumas características de projeto: simulação, otimização e criatividade

Estas características de projeto são apresentadas abaixo para ilustrar a aplicação dos modelos e sua utilização no PDP.

5.2.1 Simulação

BAZZO; PEREIRA (1997) lembram que com simulações é possível fazer inúmeras comparações de diferentes soluções sem que o número de tentativas incorra em novas despesas significativas a cada teste simulado e que por meio de uma simulação, muitas vezes é possível chegar-se a um resultado satisfatório em menos tempo do que através de outros testes. Além disso, uma simulação, como por exemplo a simulação de um voo, incorre em riscos de vida e de perda de equipamento menores que um teste real.

5.2.2 Otimização

Uma das características, apontada por BAZZO; PEREIRA (1997), que deve possuir um engenheiro de projeto é a capacidade de escolher a melhor solução. A otimização é a procura de uma solução que forneça o máximo benefício (segundo algum critério). Busca-se a condição ótima. Consiste, portanto, em maximizar ou em minimizar variáveis.

Em muitos casos o critério de otimização adotado é o fator econômico e as variáveis costumam ser: peso, resistência e rendimento.

Os processos utilizados para a otimização são a intuição ou o emprego

sistemático de técnicas específicas. A RP auxilia a intuição acrescentando-lhe elementos

para uma decisão.

Existem funções a otimizar que podem ser o custo, o peso, a confiabilidade,

a produtividade, o consumo ou o rendimento. Dependendo da função, adota-se um

método de otimização.

5.2.3 Criatividade

A criatividade - segundo BAZZO; FERREIRA (1997) - é importante

principalmente durante a fase de concepção. São procuradas idéias inovadoras, úteis,

simples e que sintetizem novas combinações de idéias e conceitos, entre formas comuns

e usuais, em quantidade, qualidade e diversidade. O casamento entre as novas

tecnologias, por exemplo, tem apresentado muitas soluções novas.

A criatividade é afetada por:

- conhecimentos que a pessoa possui, permitindo-se fazer mais e melhores

associações de idéias ou relações com problemas análogos; a RP disponibiliza

uma compreensão mais ampla do objeto estudado, dando mais elementos para a

criatividade no momento da concepção;

- esforço continuado que permite a maturação das idéias;

- aptidão, alcançada por aprendizado empírico e por uma certa dose de dom natural;

- métodos empregados, que sistematizam a "busca". A RP pode auxiliar

principalmente aqui.

As soluções mais criativas costumam ser resultado de um processo lento e

deliberado.

O desempenho profissional do engenheiro que desenvolve produtos em

muitas ocasiões dependerá desta habilidade, que pode ser aprendida e ao menos

aperfeiçoada evitando-se as barreiras que a afetam ou através de técnicas que a ativam.

Podem ser consideradas as seguintes etapas de um processo criativo:

– preparação;

– esforço concentrado;

– afastamento do problema;

– visão da idéia;

– revisão da solução.

Algumas técnicas de estímulo foram desenvolvidas para se evitar os

bloqueios e estimular a criatividade, várias delas podem utilizar um modelo RP:

– *brainstorming*: é talvez uma das técnicas mais conhecidas e consiste em estimular

um grupo (de 5 a 10 pessoas) através de um coordenador, durante um período de

45 minutos a 1 hora, a emitir idéias sobre um tema. Regras: é proibido criticar; não

há direitos de autor; deve-se gerar o maior número de soluções;

– *quebra da adaptação psicológica*: consiste em ter idéias simulando-se uma

ambientação diferente;

– *inversão*: observa-se um problema de modo oposto ao tradicional;

– *analogia*: as soluções de problemas são sugeridas a partir de situações análogas.

Marc Isambard Brunel, por exemplo, descobriu um método de abertura de túneis observando o trabalho de cupins;

– *morfológica*: aplica-se um sistema organizado para a solução de um problema,

utilizando-se de uma matriz ou de uma caixa morfológica;

- fantasia: estimula-se a criatividade através de situações fantasiosas;
 - empatia: consiste em identificar-se pessoalmente ou sentir por outro, também é utilizada com objetos, sistemas e processos;
 - caixa preta: preocupa-se apenas com os dados de entrada e de saída.
- Algumas destas técnicas já foram citadas anteriormente no texto.

6 MUDANÇAS OCORRIDAS NO PROCESSO DE PROJETO

6.1 Etapas do projeto

Um fator determinante de competitividade para as empresas tem sido a diminuição do tempo de introdução de novos produtos no mercado. Existem várias etapas a serem seguidas no processo de desenvolvimento desses produtos, desde a concepção da idéia até a sua introdução no mercado. A utilização da RP acelera cada uma das fases de projeto, sendo que as maiores modificações que a tecnologia introduz no processo são: a utilização de modelos físicos desde as fases iniciais, facilitando a percepção das mudanças necessárias; a integração entre as diversas equipes envolvidas no projeto; e o aumento da taxa de sucesso do PDP (conforme FIGURA 2.01 do capítulo 2).

Estimativas sugerem que mais de 70% do custo de um produto é determinado durante a fase de projeto e que a cada etapa o custo de uma mudança no projeto aumenta dez vezes. TIDD et al. (1997) consideram uma grande força de inovação o que chamam de “*learning before doing*”, no que as alternativas do projeto são testadas continuamente ao longo de seu desenvolvimento. A Prototipagem Rápida na medida em que produz modelos físicos já desde o início do projeto, torna-se, assim, um instrumento para este aprendizado.

Abaixo são sugeridas aplicações de diversos modelos advindos da tecnologia RP para cada uma das fases de projeto, no sentido de acelerá-las e

acrescentar qualidade. De acordo com a tabela do ANEXO B, que faz um resumo das etapas propostas por cada autor no capítulo anterior, pode-se verificar que, de certa forma, a proposta de ASIMOW (1968) envolve as outras duas, que por sua vez a detalham mais. Sendo assim, será utilizado o ciclo proposto por ASIMOW (1968), embora com a consideração de que os aspectos referentes ao produto, mas que envolvem os itens 4), 5), 6) e 7) devam ser considerados também nas etapas anteriores. Sendo assim, serão consideradas as seguintes etapas no processo de projeto com a utilização dos respectivos modelos e sua utilização mais apropriada para cada etapa:

6.1.1 Estudo de viabilidade:

Durante esta etapa podem ser utilizados modelos conceituais obtidos a partir de Impressoras 3D, que apesar de serem menos precisos, são mais baratos e cumprem as funções abaixo:

- determinar uma necessidade: pode-se verificar tal necessidade junto aos clientes, mostrando-lhes uma primeira concepção do produto;
- obter um conjunto de soluções possíveis: os objetos “prototipados” podem ser utilizados como ferramenta de comunicação de idéias entre os componentes da equipe de trabalho;
- verificar sua viabilidade: é possível verificar a aceitação do *design* do produto junto a clientes e o valor que pagariam pelo produto, por exemplo.

Nesta etapa os modelos seriam ainda do tipo conceituais, mas provenientes de equipamentos RP. Não precisam ainda ser muito precisos e, conseqüentemente, seu feito pode ser mais rápido. Estes modelos serviriam de instrumento para se escolher uma única solução ponderando-se as vantagens e desvantagens de cada uma delas. Podem ser feitos modelos para cada proposta de produto. Por serem modelos com maior precisão, melhor acabamento e maior resistência que os provenientes das impressoras 3D, permitem as primeiras verificações de montagem e facilitam os estudos de dimensionamentos das peças.

6.1.2 Projeto básico:

Nesta fase os modelos ainda poderiam ser produzidos em equipamentos RP, no entanto, para esta etapa são necessários modelos conceituais mais refinados para atender principalmente à função de especificar o produto completamente, testando-o e expedindo os documentos, para poder ser produzido: tais "protótipos" devem incluir as melhorias detectadas na fase anterior e estas melhorias devem ser, então, testadas, bem como todos os componentes do produto, principalmente quanto à montagem: encaixes e interfeências, por exemplo; por fim podem ser projetados moldes para confecção do produto final. Devido à repetibilidade das máquinas RP – só são modificadas as partes desejadas – os modelos podem ser comparados, verificando-se se as alterações de projeto realmente supõe evolução.

6.1.4 Planejamento da produção/execução:

Nesta etapa pode ser produzido um 1º padrão para ferramenta de produção ou o 1º molde por ferramenta direto, baseando-se na configuração do “protótipo” obtido na fase anterior. A partir desses moldes podem ser obtidos as primeiras pré-séries para testes mais simples, que auxiliariam o planejamento da fabricação do produto. Através de pré-séries mais simples (20 protótipos) no material do produto final, é possível fazer diversos testes e verificações com o produto. Nas iterações do processo pode-se, na medida em que já se possui as características finais do produto, e dependendo dos testes que se pretenda fazer, produzir moldes para pré-séries maiores (acima de 20 até 10.000 protótipos). Desta forma diminui-se a quantidade de testes necessária com os primeiros lotes produzidos.

6.1.5 Planejamento da disponibilização ao cliente:

A partir desta fase podem ser feitos modelos novos ou aproveitar-se dos modelos anteriores. Estes modelos seriam um auxílio para o planejamento da distribuição do produto: desde o início do projeto pode-se projetar prevenindo-se o modo como será transportado o produto e a que condições exteriores poderá ficar exposto durante o transporte ou durante seu armazenamento.

6.1.6 Planejamento do consumo ou utilização do produto:

Nesta fase a função do modelo segue as características das etapas anteriores, procurando-se planejar o uso, a manutenção, a segurança, a estética, etc. do produto.

6.1.7 Planejamento do abandono do produto:

Os modelos podem auxiliar na intuição dos projetistas quanto ao modo como o produto final ou sua embalagem deverão ser sucateados ou jogados fora desde o primeiro momento no desenvolvimento do produto.

6.2 Vantagens da RP com relação aos métodos tradicionais de prototipagem

As mudanças apontadas acima determinam as seguintes vantagens que podem ser consideradas como alguns fatores que levam as empresas a mudarem sua forma tradicional de confecção de protótipos e a adotarem a RP. São estes, entre outros, os seguintes:

- garante uma maior integração (sem a necessidade de conhecimento de desenho técnico, por exemplo) entre as diversas equipes de pesquisa, projeto, desenvolvimento, produção e vendas, possibilitando a Engenharia Simultânea, segundo FERREIRA; LAFRATTA (1998);
- torna possível a verificação da reação do consumidor frente ao produto quando ainda o projeto está no início;

– são feitos “protótipos” por RP desde a fase inicial de projeto acelerando-se o

processo e aumentando-se a confiabilidade das informações que servirão de base para as etapas seguintes, conforme VOLPATO (1999);

– reduz os riscos de inovação, de acordo com VOLPATO (1999), para produtos

considerados de natureza revolucionária, que utilizam-se de tecnologias que possuem um alto custo associado a uma falha de projeto; são apontados defeitos

potenciais desde o início;

– reduz o custo de mão-de-obra. YOGUI; OTÊNIO (1998) lembram que os

modeladores tradicionais são profissionais especializados e que a utilização desta mão-de-obra supõe um custo elevado;

– permite criar dois protótipos ou mais de uma mesma peça com uma semelhança

geométrica muito maior. YOGUI; OTÊNIO (1998) afirmam ainda que os prazos para o feito do modelo são bem mais previsíveis na RP;

– diminuição de custos decorrente da diminuição do número de ciclos da espiral de

projeto, cujo conceito é apresentado abaixo;

6.3 Conceito de espiral de projeto

As etapas de projeto não seguem uma linearidade dentro do

desenvolvimento do projeto, pois cada item não fica plenamente definido antes da etapa seguinte. O desenvolvimento é, portanto, iterativo, pois cada item depende dos outros

para que o sistema funcione harmoniosamente. Assim, a evolução de um projeto pode ser definida pela imagem de uma espiral (Espirais de Projeto), exemplificada na

FIGURA 6.01, como define KAMINSKI (2000), em que na primeira volta os itens são

definidos de modo grosseiro, aproximado, e essa definição vai ficando mais precisa nas voltas seguintes até se convergir para a configuração final do projeto.

Um exemplo teórico de uma espiral de projetos, com os tipos de modelos requeridos, pode ilustrar este conceito. O ponto de partida poderia ser uma necessidade observada no mercado por uma equipe de *marketing*. Tal necessidade poderia ser, por exemplo, de um carrinho para transportar crianças de até 3 anos de idade e que seja movido à bateria elétrica. Sendo assim poderia seguir-se o seguinte processo de projeto:

A partir de um desenho tridimensional onde já se determina um estilo e já se estuda pelo menos uma ideia da *estrutura* e das *partes móveis*, já se pode fazer um protótipo conceitual para fazer uma pesquisa de aceitação do produto entre as mães (formato, beleza, cores, etc.) e alguns testes com bebês (ergonomia e conforto - se não choram, se conseguem dormir, etc.).

Com o resultado desta pesquisa fazem-se as devidas correções no *desenho* e procura-se estabelecer as *partes mecânicas* que serão utilizadas no carrinho, tais como rodas, eixos, sistema de direção, etc.

Para acionar estas partes mecânicas determinam-se os *componentes eletrônicos*, tais como motores, selecionadores de velocidade, se será acionado por controle remoto, etc., e se refinam as *peças mecânicas*, tais como as engrenagens que serão utilizadas para a transmissão de movimento. Tanto neste estágio, como no anterior pode-se usar os *protótipos* para verificar as *montagens*, *encaixes*, etc.

Já com uma ideia visual e de localização de cada componente montado no produto passa-se a pensar na *estrutura* para suportar todos os esforços estáticos, tais como peso do motor, peso da criança (pode-se considerar de certa forma como esforço estático) e de todas partes móveis, bem como o *materia* a ser utilizado para cada item.

Rearranjam-se as partes, reestuda-se o *design* para se adequar à estrutura ou vice-versa, redimensiona-se o motor e as partes mecânicas para que não fiquem nem sub, nem superdimensionados. Nesta volta da espiral pode-se montar um protótipo mais próximo do produto definitivo para novos testes de funcionamento.

Novas mudanças podem ser requeridas devido à condição de funcionamento, uma vez que nas primeiras etapas as considerações são mais de ordem estática do que dinâmicas.

A cada volta da Espiral de Projeto (FIGURA 6.01), onde vão ocorrendo os aprimoramentos do projeto, pode-se novamente submeter o produto a avaliação do mercado e já ir estudando-se o modo como poderá ser produzido o produto. Podem ser feitos protótipos de moldes para fundição, injeção de plásticos, etc.

Enfim, deve-se pensar no modo de distribuição do produto e consequentemente na embalagem que poderá ser utilizada para transporte e armazenagem. Isto pode requerer novas mudanças nas etapas anteriores.

Com a visualização contínua do produto é mais fácil que ocorra a Engenharia Simultânea, evitando-se que estas avaliações se dêem tardiamente.

O modelo de uma espiral de projetos foi escolhida para análise por sua simplicidade e aplicabilidade ao PDP.

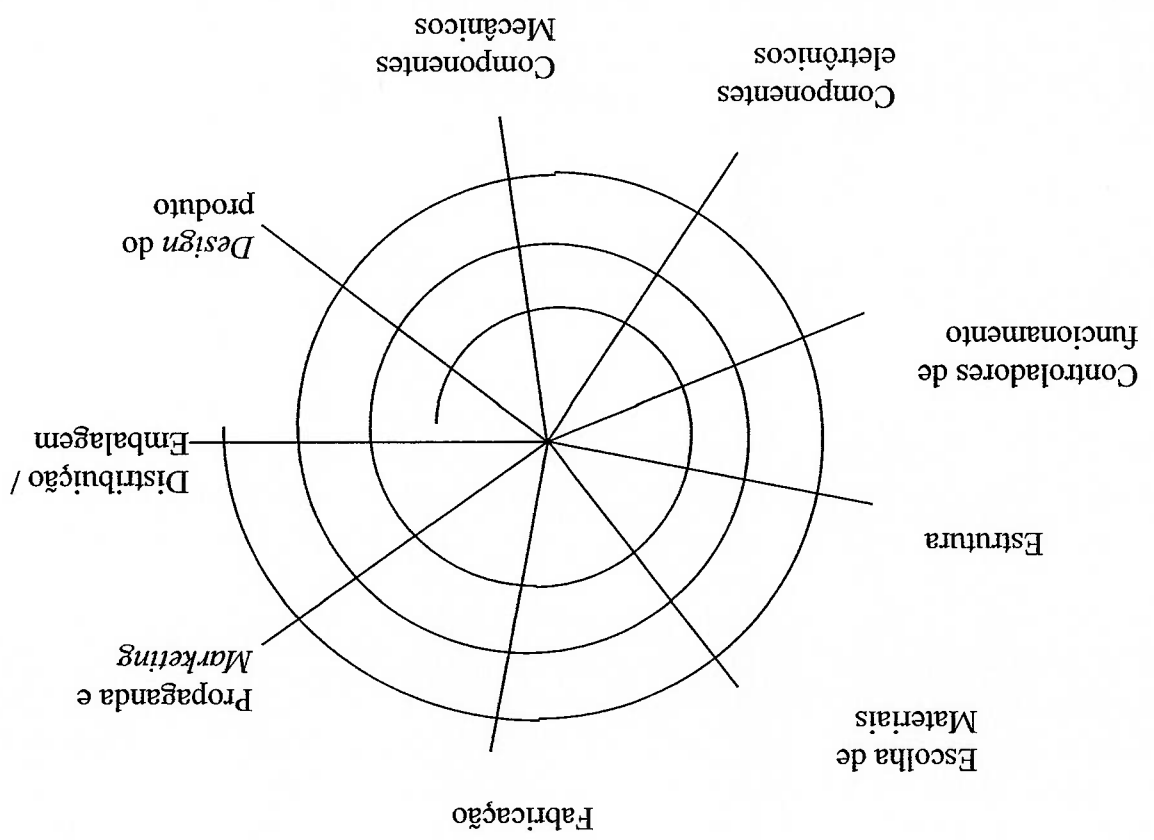


FIGURA 6.01 Exemplo de uma Espiral de Projeto: a cada volta o produto é aprimorado

6.4 Modelo de utilização da RP dentro da espiral de projeto

Com a utilização de “protótipos” há uma maior integração entre as diversas equipes de trabalho envolvidas nas atividades de desenvolvimento de produtos: setor comercial, marketing, engenharia, produção, logística, suprimentos, controladoria e diretoria. Isto ocorre, principalmente, devido à visualização em três (3) dimensões do produto, facilitando a atividade destes profissionais e diminuindo o número de voltas na espiral.

Abaixo é apresentado um modelo (FIGURA 6.02) de como os modelos obtidos por RP podem ser utilizados dentro da evolução no desenvolvimento do produto a cada “volta” na espiral.

- 1) Modelo Conceitual (impressora 3D);
- 2) Primeiro RP: verificações de encaixe / montagem;
- 3) Segundo RP: refinamentos visando ergonomia, design, manutenção, testes de campo;
- 4) Terceiro RP (padrão para molde) ou Primeiro Molde: maior precisão visando estudo do processo de fabricação e fabricação de moldes e ferramentas;

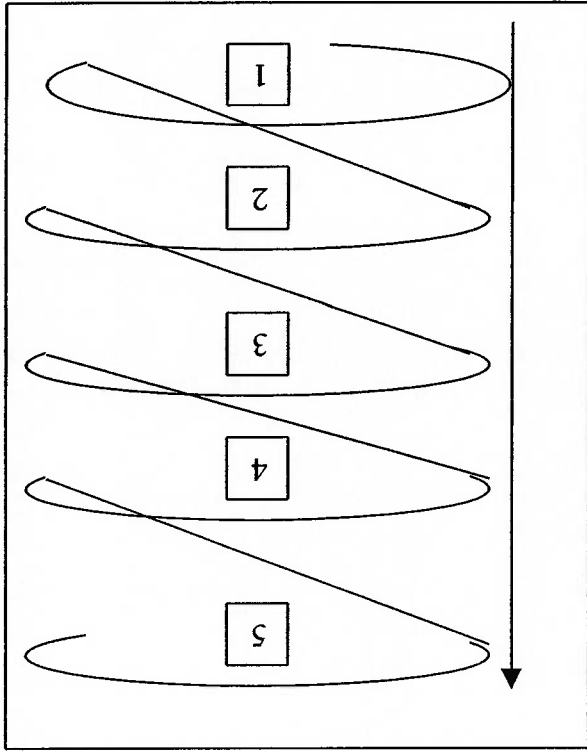


FIGURA 6.02 Modelo de uma espiral de projeto com a utilização de protótipos rápidos

adequados para cada ciclo

7 ESTUDO DE CASOS

7.1 Questionário utilizado

Neste capítulo são apresentados dois (2) casos para serem estudados com relação às hipóteses adotadas nos capítulos precedentes. O estudo foi feito em duas empresas diferentes através de entrevistas que se basearam no questionário que se encontra no APÊNDICE. As perguntas foram explicadas e as respostas foram anotadas durante a entrevista. Antes de se elaborar o questionário foi feita uma pesquisa sobre o método mais adequado de aplicação de questionários.

7.2 Resultados do questionário

Os resultados das entrevistas realizadas são apresentados a seguir, sendo que a empresa A é uma empresa que produz peças para o setor automotivo e a empresa B pertence ao setor de telecomunicações.

7.2.1 Empresa A

A empresa é bastante especializada: produz peças para a iluminação de veículos, mais especificamente faróis para motos (70% dos projetos são para a *Honda*). É prestadora de serviços e, portanto, geralmente não participa da tomada de decisão em

todas as fases do projeto, mas somente opina. No caso dos projetos para a *Honda* do Japão, por exemplo, o desenvolvimento do projeto é feito pelos japoneses, mas se recorre à produção aqui no Brasil e a RP é utilizada como um modo de validação dos projetos (visualização para troca de idéias entre as equipes de trabalho e para a exposição ao público em eventos tais como feiras, estudo da produção e de possíveis falhas, estudo do *design* do produto, verificações de encaixes e montagens, etc.). A empresa é pequena (300 funcionários, apenas 10 projetos em andamento), mas com um faturamento anual razoável: aproximadamente R\$ 12.000.000,00. Alguns clientes apontados, além da *Honda* (Japão e Brasil) foram:

| | |
|---|------------------------|
| – | Mercedes Benz |
| – | Scania |
| – | Yamaha |
| – | Volvo |
| – | New Holland (tratores) |
| – | Renault |

Devido à necessidade de cumprir prazos, a empresa recorre com frequência (20 a 40% dos casos, principalmente na fase inicial do projeto) à prestadora de serviços Robtec quando necessita fazer protótipos utilizando a RP. A RP é utilizada, principalmente, quando é solicitada pelo próprio cliente, no entanto, muitas vezes é também sugerida e divulgada pela própria empresa A.

Consequência do que foi mencionado acima, a empresa não desenvolve projetos próprios e portanto possui pouca autonomia e flexibilidade para fazer alterações nos projetos. Os testes (considerados funcionais apesar das limitações do protótipo, principalmente quanto ao material) costumam ser feitos no próprio cliente

(aerodinâmica, testes de campo, resistência quanto à vibração, tensões, apertos de parafuso, encaixe e montagem), mas muitos defeitos são apontados pela empresa, principalmente quanto à possibilidade de execução ou não do produto.

O conceito de Espiral de Projeto como modelo para projetos não é utilizado diretamente pela empresa, que faz uma ARP (Árvore de Pré-Requisitos) para controle do andamento do desenvolvimento de seus produtos, designando para cada ação e sub-ação responsáveis e os prazos para suas conclusões, no entanto, no inter-relacionamento entre os grupos que estão envolvidos, acaba-se informalmente e desordenadamente percorrendo-se os ciclos da Espiral. Os protótipos ajudam nessa integração entre as equipes e com o próprio cliente que acaba determinando mudanças no projeto a cada refinamento no desenvolvimento do produto (determinação do material, localização de aspectos críticos da peça montada no conjunto - tais como rachaduras ou trincas -, etc.). O próprio "chão de fábrica" opina sobre o produto e sua fabricação. Comumente a RP é utilizada no início do projeto para as primeiras determinações.

A comparação entre os custos do projeto utilizando-se ou não a RP fica comprometida, na medida em que não há dados sobre o desenvolvimento de um mesmo produto por estes dois modos diferentes. Apesar disso a empresa considera que a RP reduz custos, principalmente pela redução do tempo para o mercado.

A transparência e a possibilidade de confeccionar-se protótipos coloridos aparece como um requisito específico importante na avaliação dos protótipos para esta empresa. Eles muitas vezes recorrem ao processo RTV para obter "protótipos" de uretano, que é colorizado por adição de pigmentos.

A estimativa de prazo para a entrega de um protótipo foi relativamente alta (1 mês), embora se recorra à tecnologia sempre que os projetistas estão em "apuros".

Existe ainda uma insegurança quanto aos resultados, pois até que o primeiro protótipo (feito com o auxílio de molde de silicone) fique pronto não há outra garantia que a confiança no trabalho da prestadora de serviço.

7.2.2 Empresa B

Como mencionado anteriormente, a empresa B pertence ao setor de telecomunicações com uma produção anual de três milhões (3.000.000) de telefones e fatura aproximadamente R\$ 20.000.000,00 por ano. A empresa é alemã e possui um convênio com o CEFET-PR em Curitiba, onde se localiza também a filial visitada, que produz centrais telefônicas, PABX e mini-PABX e possui 1000 funcionários. Nesta mesma unidade localiza-se o centro de desenvolvimento da empresa. A pessoa que foi entrevistada é técnico de desenvolvimento e trata diretamente com os assuntos relativos à RP e encomenda os pedidos de modelos RP para a empresa. No setor Dispositivos de Comunicação, onde trabalha o entrevistado, trabalham mais nove funcionários.

A empresa estava com quatro projetos em andamento, dos quais três estavam utilizando modelos RP. Desde 1993 a empresa B desenvolveu aproximadamente vinte produtos com o auxílio da RP. O primeiro projeto foi o desenvolvimento de uma tampa para um telefone.

O CEFET-PR adquiriu um equipamento FDM 2000 em 1998 como parte integrante dos equipamentos do Núcleo de Pesquisa em Engenharia Simultânea (NUPES), que foi montado em convênio com a empresa B. A escolha do equipamento feita por este núcleo de pesquisa foi determinada principalmente pelo preço do equipamento. A empresa B, devido ao convênio, não paga por serviço prestado e tem

prioridade na utilização dos equipamentos. O entrevistado, portanto, não possuía dados para avaliar a economia no custo de projeto devida à utilização de modelos RP, no entanto afirmou que sem dúvida o investimento no equipamento já foi "pago" nestes dois anos. Além disso, afirmou que de fato há muitas vantagens para a empresa na utilização dos modelos RP que os utiliza a cada reunião para as discussões entre os integrantes da equipe de desenvolvimento de produtos.

Apesar de possuir o convênio, a empresa encomendou à Flag um modelo SLS de um suporte para telefone em janeiro de 1999 (custou aproximadamente R\$ 270,00), pois necessitou que o modelo possuísse maior resistência para poderem realizar um teste funcional.

Quanto à tecnologia SL, conheciam apenas um modelo que receberam do Japão, mas desconheciam o processo tecnológico e suas potencialidades. Quanto ao processo LOM e às demais aplicações da RP, também não possuíam informações.

As seguintes vantagens para a utilização de modelos RP foram apresentadas pela empresa :

– é possível verificar com antecedência as mudanças de projeto que serão necessárias. Como exemplo, expôs que após serem encomendados quatro moldes para a injeção em plástico, de algumas peças (o jogo custou aproximadamente R\$ 100.000,00), percebeu-se uma necessidade de alteração devido a um teste feito com um modelo RP, enquanto o molde ainda estava sendo feito. Caso a empresa não tivesse recorrido ao auxílio da RP e tivesse que testar os primeiros protótipos provenientes de um primeiro lote obtido pela produção com a utilização do molde, teria que inutilizar este molde, mandar executar outro e ter-se-ia perdido tempo e dinheiro.

— aumenta a rapidez de desenvolvimento dos produtos, pois as equipes de trabalho podem verificar suas idéias e discutir sobre elas com maior facilidade, havendo maior integração e simultaneidade durante o processo de projeto. Ocorre uma comunicação maior entre as pessoas de diversos setores: engenheiros elétricos, vendedores, projetistas, engenheiros de processo e de produção.

A empresa não possui máquinas de ferramentaria e utiliza os modelos tal como são enviados pelo CFFFT-PR (este também só retira o material de suporte e alguma rebarba). A injeção de plástico na fase de produção também é terceirizada e é feita pela Multibrás de Manaus (a empresa B também possui uma filial nesta cidade).

Os modelos FDM possuem para as finalidades da empresa, segundo o entrevistado, uma boa precisão dimensional e durabilidade, no entanto, apresentam rugosidade alta e um acabamento superficial grosseiro. A empresa também não confia nestes modelos para testes de resistência mecânica.

Devido às características consideradas no item anterior, a empresa utiliza os modelos principalmente para checagens de montagem (60% dos casos) e para visualização (40%). Dos testes feitos, um (1) a cada vinte (20) são testes de campo (“funcionais”). Através da sensibilidade de clientes-chave, que utilizam o protótipo durante três meses, verifica-se a satisfação do mercado com o produto.

Com relação à montagem, são verificadas principalmente as interferências e a funcionalidade das peças montadas no conjunto. Além disso, os modelos auxiliam na verificação da ergonomia do produto. Já quanto à visualização do produto, os modelos permitem que rapidamente seja verificado o formato do produto inclusive por profissionais que não possuem formação em desenho técnico: o objeto tridimensional é

mais intuitivo que o desenho bidimensional, pois é possível tocar as peças sólidas e não

apenas visualizar linhas.

Quanto aos pontos fracos do sistema FDM foram apontados: a imprecisão de furos (não é possível precisão melhor que 0,05 mm); a fragilidade de pequenas travas feitas para garras (nestes casos a resistência obtida equivaleria a aproximadamente 30% da resistência do plástico injetado, segundo o entrevistado); e a perda de definição dos detalhes pequenos. Como solução, sugeriu-se a possibilidade de a máquina possuir um cabeçote mais fino.

A empresa possui as seguintes etapas de projeto:

1. *Status* de desenvolvimento;

2. *Status* de logística (pré-projeto: encomenda de insumos, pré-séries);

3. *Status* final de projeto.

Após cada uma destas etapas o projeto fica disponível (liberado) para os

demais setores da empresa.

As informações dentro do projeto seguem o fluxo seguinte (FIGURA 7.01):

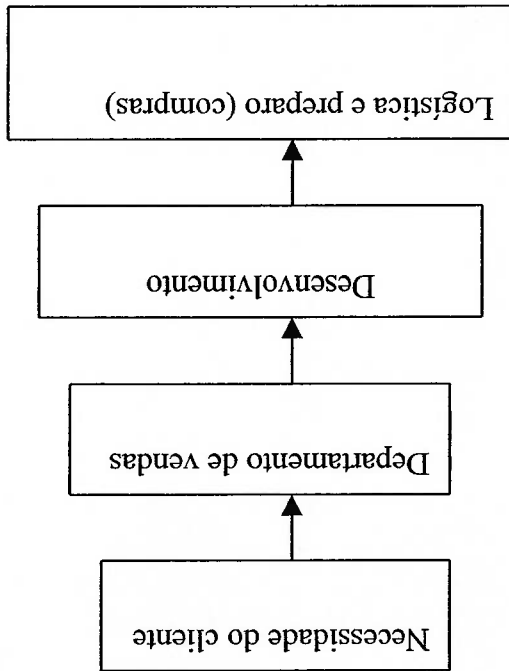


FIGURA 7.01 Fluxograma de informações durante o projeto

O projeto é apenas adaptado no Brasil às condições locais (para as mudanças feitas para o mercado brasileiro não é necessário autorização) e muitas informações da Alemanha vem com algumas barreiras para a execução de alterações, tais como o fato de que os desenhos muitas vezes ainda são enviados em papel, o que dificulta o feito de modelos FDM. Os projetos para exportação restringem-se à verificação da viabilidade técnica de serem produzidos no Brasil e a sugestão de mudanças.

São feitas reuniões semanais entre os projetistas, os responsáveis pela produção e os responsáveis pelas vendas, que habitualmente trocam idéias sobre o projeto com um modelo RP na mão, aumentando a capacidade criativa da equipe. Foi citado durante a entrevista um exemplo no que o espaço para a placa de um circuito foi determinado em conjunto entre os projetistas e os engenheiros eletrônicos.

A empresa considera ainda que o produto final torna-se mais refinado - além

de chegar mais rapidamente ao mercado e com menor preço -, ganhando qualidade devido à utilização de modelos RP nas fases de seu desenvolvimento.

Em média a empresa espera 2 dias para receber um modelo RP após ter enviado o modelo em CAD para o CEFET-PR e costuma recorrer à prestadora de serviços principalmente quando o projeto já está um pouco mais detalhado (projeto básico e executivo), uma vez que o projeto já vem elaborado da Alemanha e terceiriza a produção e, portanto, não tem a necessidade de fazer testes nestas fases de desenvolvimento. No entanto, ao projetar consideram-se as etapas precedentes e posteriores. Um dos fatores considerado importante pela a empresa é a facilidade de montagem, pois são produzidos 700 telefones por hora.

Após a entrevista foi mostrado um projeto de uma leitora de cartão telefônico. O projeto foi realizado para uma grande empresa espanhola de telefonia, que se instalou no país e necessitava adaptar seus telefones públicos para operarem com cartão indutivo (tecnologia brasileira), pois era exigido pela Telebrás:

1. devido ao vandalismo (inserção de fragmentos de cartão e outros objetos na leitora “entupindo” o orifício) e à fraude (a queima das trilhas de leitura não era completa e nem sequencial, permitindo que a ligação fosse efetuada com dois cartões usados) foram requisitadas adaptações que não permitissem a inserção de mais de um cartão simultaneamente no orifício de entrada da leitora, que queimasse sequencialmente o cartão e que permitissem a expulsão de possíveis fragmentos da leitora (exigência da Anatel).

2. a solução adotada para a expulsão dos fragmentos foi um sistema de abertura por alavanca, com a leitora instalada na posição vertical. Esta solução já havia sido

4. na montagem com modelos RP, percebeu-se que haveria interferência entre o e o coque para moedas (o telefone também funciona com moedas) e o conector de saída da leitora. Após esta constatação, mudou-se a posição do conector, alterando-se novamente o circuito. Apenas com o desenho não se havia percebido a interferência, problema usando o molde.

3. durante o processo de adaptação do produto tentou-se reduzir a leitora de duas placas de circuito para uma única. Isto poderia ser possível mudando a posição das bobinas que estavam dispostas em diagonal para uma posição em paralelo. Esta tentativa e outras até chegar-se a uma solução final com uma disposição de duas placas mas ocupando menos espaço, foram feitas com modelos RP, simultaneamente com os outros testes já mencionados. Também a tampa de proteção do circuito teve que ser alterada algumas vezes durante as diversas buscas para a solução final. A última mudança foi um reforço feito devido ao pino de fim de curso. Neste caso, o molde para a tampa já estava pronto, mas foi possível resolver o

e a mudança do conector ocorreu paralelamente com as demais tentativas de modificação do circuito.

5. outra alteração do projeto anterior foi o ajuste do bocal para que fosse possível a inserção de apenas um cartão por vez (0,45 mm) e a mudança de bocal inteirigo para um feito em duas partes, não sendo mais necessária uma gaveta no molde.

8 CONCLUSÃO

Ao longo da pesquisa um foco importante de atenção foi, se haveria ou não, a viabilidade de uma empresa adquirir um equipamento de Prototipagem Rápida e quais as vantagens que traria para uma empresa a utilização de modelos feitos por esta tecnologia.

Embora no início da pesquisa a tecnologia parecesse instável - uma vez que surgiram várias produtoras de equipamentos, cada uma com um processo diferente -, durante o período de desenvolvimento deste trabalho, a Prototipagem Rápida foi se consolidando cada vez mais no mercado mundial e brasileiro, dando maior segurança para se trabalhar com seus "protótipos".

Os benefícios da utilização destes equipamentos ficam cada dia mais evidentes e fica claro que as empresas que desenvolvem produtos e querem permanecer com competitividade no mercado necessitam migrar para a compra ou utilização de algum desses equipamentos. Várias destas vantagens foram apresentadas nesta dissertação. No entanto, não basta somente comprar uma "máquina de produzir protótipos", mas é preciso mudar os paradigmas da utilização de modelos durante as etapas de projeto, integrando as equipes de trabalho.

Ainda são poucas empresas no Brasil que desenvolvem produtos ou buscam melhoria contínua de seus projetos, no entanto, o processo de globalização econômica

tem forçado várias empresas a equiparem-se para desenvolver seus produtos e tornarem-se competitivas no mercado mundial.

Muitas vezes tem compensado mais para as empresas encomendarem serviços RP a terem os equipamentos, pois sua demanda de pesquisa de novos produtos ainda é baixa. A aquisição dos equipamentos só é viável para empresas grandes que desenvolvem grande número de projetos, para prestadoras de serviço ou institutos de pesquisa (que em geral também prestam serviços). A requisição de serviços no Brasil e no mundo tem crescido, sendo que a lista de clientes de uma prestadora no Brasil chega a milhares de clientes.

VOLPATO (1999) comenta que: "A prototipagem justifica-se quando os testes com protótipos aumentam substancialmente a probabilidade das atividades subsequentes serem desenvolvidas sem iteração". Sendo assim, só é vantajoso para uma empresa inserir modelos RP numa atividade de projeto se com isso conseguir diminuir o número de voltas na espiral de projeto.

Os clientes RP, entretanto, em muitos casos desconhecem os vários sistemas e as vantagens de cada um, e por falta de informação acabam não escolhendo os modelos mais adequados às suas necessidades.

As principais mudanças que podem ser feitas no processo de desenvolvimento de produtos decorrentes da utilização de modelos RP são a utilização mais frequente de modelos e desde o início do projeto. Desta forma, os possíveis erros de projeto serão detectados o quanto antes, evitando-se mudanças de projeto nas fases finais que, sem dúvida, correspondem a um custo maior e desperdício de tempo.

As etapas de projeto podem permanecer as mesmas que já vinham sendo adotadas pelas empresas, no entanto, o tempo despendido em cada uma delas pode ser

PC, ou ainda, que serão utilizadas como fax tridimensional. Será possível estudar impressoras tridimensionais serão "popularizadas" e serão utilizadas pelos usuários dos em dois materiais diferentes, sem a necessidade de conexões, por exemplo, ou que as

É possível especular que futuramente serão produzidos objetos diretamente que não se conseguisse usar.

pode tornar-se um processo de produção alternativo para formas geométricas complexas projeto. A produção direta de produtos através da tecnologia de composição de camadas crescentes feitas nesta área projetam ainda novas mudanças na concepção atual de Os desenvolvimentos no campo dos equipamentos RP e as pesquisas maior otimização deve-se planejar melhor a utilização da RP.

maior antecedência a partir do momento que se passou a utilizar a RP, mas para uma desordenadamente e com baixa eficiência. Muitos problemas foram detectados com processo de desenvolvimento ocorrem quase que automaticamente, embora Através dos casos estudados foi possível verificar que as mudanças no mais promissor.

criativas. Devido a este aspecto, as impressoras tridimensionais possuem um mercado opinar sobre o resultado final do desenvolvimento ou sugerir outras alternativas o processo de produção e de desenvolvimento e com os desenhos técnicos, podem instrumento de comunicação: pessoas menos especializadas e pouco familiarizadas com A RP auxilia sobretudo a engenharia simultânea como excelente modelos RP.

considerada a simultaneidade de ações, que é amplamente facilitada pela utilização dos bem menor, e dentro do conceito de espiral de projeto, cada vez mais deve ser

microorganismos em escala ampliada ou fazer maquetes a partir de imagens obtidas por

satélites, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASIMOW, M. **Introdução ao projeto de engenharia**. São Paulo, Ed. Mestre Jou, 1968.
- ASHLEY, S. *Rapid Prototyping is coming age Mechanical Engineering*, jul. 1995
- BARAKAN, P.; IANSITI, M. *Prototyping:- a Tool for Rapid Learning in Product Development*. Concurrent Engineering: Research and Applications, v. 1, 1993, pp. 125-134 apud VOLPATO (1999)
- BAZZO W. A.; PEREIRA, L. T. do V. **Introdução à Engenharia** 5.ed. Florianópolis, Editora da UFSC, 1997. 272p.
- BREITINGER, F. *Rapid Tooling for Simultaneous Product and Process Development (Part I and II)* *Rapid News*, v.5, n.5 e v.5, n.6, 1997 apud VOLPATO (1999)
- CHUA, C. K.; CHOU, S. M.; WONG, T. S. *A Study of the State-of-the-Art Rapid Prototyping Technologies* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14, p.146-52, 1998.
- DIETER, G. E. *Engineering design; a materials and processing approach*. USA. McGraw-Hill Company, 1983 apud BAZZO; PEREIRA (1997)
- FERRERA, A. C.; LAFRATTA, F. H. Conheça alguns meios para a obtenção de protótipos de peças injetadas. *Revista Plástico Industrial*, Setembro, p. 24-30, 1998.
- FERRERA, J. B. R.; MIGUEL, P. A. C. Proposta de Metodologia para Introduzir Qualidade no Planejamento do Processo [on line]. In: SIMPÓSIO DE

ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, VI, Bauru, 1999. *Anais*. nov. 1999.

<www.bauru.unesp.br/acontece/simpep.html> [24 Nov. 1999]

GOMIDE, R. B. **Fabricação de componentes injetados em insertos produzidos por estereolitografia.** Florianópolis, 2000. 156p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

HOCK, S.; KNEISEL, T. **A prototipagem rápida é o caminho mais curto para a fabricação de peças.** Máquinas e Metais, julho, pp. 24-35, 1996.

HUBINGER, A. Z.; CARVALHO, J.; LIRANI, J. *Rapid Prototyping - Concepts, Techniques, Applications and Future Trends.* XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 1999. *Anais*. Águas de Lindóia, S. P., Nov., 1999.

JACOBS, P. F. *Rapid Prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography.* SME, 1992 apud VOLPATO (1999)

JOHNSON, J. L. *Principles of complete automated fabrication* Paleino, 1994 apud CHUA et al (1998)

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

KAUFELD, M.; MORBITZER, S. Uma técnica que já pode ser usada no escritório *Máquinas e Metais*, maio, p. 28-36, 2000.

KOCHAN, D.; CHUA, C. K. *State-of-the-art and future trends In advanced prototyping and manufacturing International Journal of Information Technology*, 1 (2), pg. 173-184, 1995

KRUTH, J.,-P.; LEU, M., C.; NAKAGAWA, T. *Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping.* In: CIRP, 1998. *Annals*, Vol. 47/2, pp. 525-540, 1998.

- MARIBONDO, J. F.; BACK, N.; FORCELLINI, F. A.; OGLIARI, F. Ferramenta de Apoio à Fase do Projeto Conceitual: Síntese Funcional de Sistemas Modulares [on line]. In: CONEM, Rio Grande do Norte, 2000. Anais. <<http://www.ufm.br/conem2000>>
- NETTO, A., J. Prototipagem rápida agiliza o desenvolvimento de produtos Metal-Mecânica, Agosto/Setembro, p. 8-17, 1999.
- PHAM, D. T.; DIMOV, S.; LACAN, F. *Techniques for firm tooling using rapid prototyping*, Proc Instn Mech Engrs, Vol 212, Part B, Nov 1997
- TIDD, J.; BESSANT, J.; PAVITT, K. *Managing Innovation: integrating, market, and organizational change* Chichester, John Wiley & Sons Ltd, p. 250-261, 1997.
- VOLPATO, N. Prototipagem rápida / Ferramenta rápida no processo de desenvolvimento de produto. *Máquinas e Metais*, Junho, p. 76-89, 1999.
- WAGNER, J.; STEGER, W. *Rapid Prototyping - An Approach Beyond Manufacturing Technology*, in RIX, J.; HAAS, S.; TEIXEIRA, J., eds, *Virtual Prototyping: virtual environments and product design process* Chapman&Hall, 1995 apud VOLPATO (1999)
- WOHLERS, T. *Rapid Guide to Rapid Prototyping*. Minneapolis, Wohlers Associates. p 1-11, 1996.
- WOHLERS, T. *Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry: 1998 World Wide Progress Report*. Fort Collins, Wohlers Associates, 1998.
- WOHLERS, T. *Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry: 1999 World Wide Progress Report* [on line]. Wohlers Associates, 1999. <<http://www.wohlersassociates.com/99state.htm>>

YOGUI, R.; OTÊNIO, D. Do Projeto à Prototipagem. São Paulo, CADware®Publishing & Internet, *Cadware Technology*, Ano III, n.º 10, Nov/Dez, 1998.

ANEXO A: Lista de artigos sobre prototipagem rápida pesquisados

Os "artigos" estão em ordem seguindo a classificação adotada:

1. Aplicações da RP:

CHEN, Y. H.; NG, C. T. Integrated Reverse Engineering and

Rapid Prototyping Computers ind. Engng Vol. 33, Nos 3-4, Proceedings of

1996 ICC&IC, 1997

Innovative Technique for Rapidly Prototyping Parts of Polymers,

Metals, Ceramics, Composites, and Functionally Graded Materials.

Materials Technology, v.11, nº 6, 1996

KAI, C. C.; JACOB, G. G. K.; MEI, T. Interface Between CAD and

Rapid Prototyping Systems. Part 1: A Study of Existing Interfaces. The

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997

KAI, C. C.; JACOB, G. G. K.; MEI, T. Interface Between CAD and

Rapid Prototyping Systems. Part 2: LMI - Na Improved Interface. The

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997

MILLER, J. L.; GROTE, K. -H. Solid Freeform Manufacturing

Technologies as an important step in the product development process

Computers in Industry, 28, 1995

- YAN, Y.; ZHANG, R.; LU, Q.; DU, Z.: Study on multifunctional rapid prototyping manufacturing system. MCB University Press, Integrated Manufacturing Systems 9/4, 1998
- MÄULE, B.; SCHMID, D.; BERGER, U.: Robots for Rapid Prototyping and for tooling of High Volume Workpieces IECON-Proceedings-(Industrial-Electronics-Conference). V4 IEEE Comp Soc, 1998
- CHERNG, J. G.; SHAO, X.-Y.; CHEN, Y.: Feature-based part modeling and process planning for rapid response manufacturing Computers ind. Engng, Vol. 34, n.º 2, 1998
- STUCKER, B.; BRADLEY, W.; EUBANK, P. T.; NORASSETHEKUL, S.; BOZKURT, B.: Zirconium Dioxide/Copper EDM Electrodes From Selective Laser Sintering
- DAS, S.; BEAMAN, J. J.; WOHLERT, M.; BOURLELL, D. L.: Direct laser freeform fabrication of high performance metal components Rapid Prototyping Journal, Vol. 4, n.º 3, 1998
- REES, M.: Rapid prototyping and art Rapid Prototyping Journal, Vol. 5, n.º 4, 1999
- WIEDEMANN, B.; JANTZEN, H.-A.: Strategies and applications for rapid product and process development in Daimler-Benz AG Computers in Industry, 39, 1999
- HAZONY, Y.; ZEIDNER, L.: Seamless Design-to-Manufacture of Marine Propulsers: A Case Study for Rapid Response Machining Journal of Manufacturing Systems Volume 13, No. 5

- TSAI, Y. -C.; JEHNG, W. -K. Rapid Prototyping and manufacturing technology applied to the forming of spherical gear sets with skew axes Journal of Materials Processing Technology Volume 95, 1-3
 Out, 1999
- BOHN, J. H. Integrating rapid prototyping into the engineering curriculum – a case study. Rapid Prototyping Journal, Volume 3, n.º 1,
 1997
- KAI, C. C.; MENG, C. S.; CHING, L. S.; HOE, E. K.; FAH, L. K.
Rapid Prototyping Assisted Surgery Planning The International Journal of
 Advanced Manufacturing Technology 14, 1998
- BERTSCH, A.; JÉZÉQUEL, J. Y.; ANDRÉ, J. C. Study of the spatial resolution of a new 3D microfabrication process: the microstereophotolithography using a dynamic mask-generator
technique Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 107 Nov,
 1996
- KRISHNAN, A.; NASSAR, R. Rapid prototyping using excimer laser microfabrication system SPIE Vol. 3512 Set, 1998
- FRIEDRICH, C.; COANE, P.; GOETTERT, J.; GOPINATHIN, N.
Direct fabrication of deep x-ray lithography masks by micromechanical milling Precision Engineering, vol 22, n.º 3 Jul, 1998
- KHOSHNEVIS, B. Innovative Rapid Prototyping Process Makes Large Sized, Smooth Surfaced Complex Shapes in a Wide Variety of Materials Matrice Technology Ltd., 1998

- CHILDS, T. H. C.; BERZINS, M.; RYDER, G. R.; TONTOWI, A.
Selective laser sintering of an amorphous polymer - symulations and experiments Proc Instn Mech Engrs Vol 213 Part B, 1999
- SONMEZ, F. O.; HAHM, H. T. Thermomechanical analysis of the laminated object manufacturing (LOM) process. Rapid Prototyping Journal, Volume 4, n.º 1, 1998
- PARK, J.; TARI, M. J.; HAHN, H. T. Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process Rapid Prototyping Journal, Vol. 6, n.º 1, 2000
- ONU, S. O.; HON, K. K. B. An Experimental Investigation into the Effect of Hatch Pattern in Stereolithography Annals of the CIRP Vol. 47/1, 1998
- RAMESH, K.; KUMAR, M. A.; DHANDE, S. G. Fusion of Digital Photoelasticity Rapid Prototyping and Rapid Tooling Technologies Experimental Techniques Mar/Abr, 1999
- IRVING, R. Taking a powder Mechanical Engineering Set, 1999
- CHO, U.; WOOD, K. L.; CRAWFORD, R. H. On line functional testing with rapid prototypes: a novel empirical similarity method. Rapid Prototyping Journal, Volume 4, n.º 3, 1998
- JACKSON, T. R.; LIU, H.; PATRIKALAKIS, N. M.; SACHS, E. M.; CIMA, M. J. Modeling and designing functionally graded material components for fabrication with local composition control Materials and Design 20, 1999

- FERRREIRA, A. C.; LAFRATT, F. H.. Conheça alguns meios para a obtenção de protótipos de peças injetadas. Revista Plástico Industrial, Set, 1998
- (MCP Equipament) Cutting costs in rapid prototyping AEAT Nov/Dez, 1995
- WILLIAMS, J. D.; DECKARD, C. R. Advances in modeling the effects of selected parameters on SLS process Rapid Prototyping Journal, Vol. 4, n.º 2, 1998
- CHILDS, T. H. C.; JUSTER, N. P. Linear and Geometric Accuracies from Layer Manufacturing Annals of the CIRP, Vol. 43/1 Jan, 1994
- FUH, J. Y. H.; LU, L.; TAN, C. C.; SHEN, Z. X.; CHEW, S. Curing characteristics of acrylic photopolymer used in stereolithography process Rapid Prototyping Journal, Vol. 5, n.º 1, 1999
- GIBSON, I.; SHI, D. Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process Rapid Prototyping Journal, Vol. 3, n.º 4, 1997
- BUGEDA, G.; CERVERA, M.; LOMBERA, G. Numerical prediction temperature and density distributions in selective laser sintering process Rapid Prototyping Journal, Vol. 5, n.º 1, 1999
- CHUK, R. N.; THOMSON, V. J. A comparison of rapid prototyping techniques used for wind tunnel model fabrication. MCB University Press, Rapid Prototyping Journal, Volume 4, n.º 4, 1998

- THOMSON, G.; PRIDHAM, M. S. Controlled laser forming for rapid prototyping Rapid Prototyping Journal, Vol. 3, nº4, 1997
- KUNIEDA, M.; KATOH, R.; MORI, Y. Rapid Prototyping by Selective Electrodeposition Using Electrolyte Jet Annals of the CIRP Vol. 47/1, 1998
- Speed is redefined for rapid prototyping Eureka Mai, 1998
- 2. Aspectos gerais da tecnologia:**
- LANGDON, R. Rapid Prototyping Automotive engineer Mai, 1998
- SMITH, P. G. The business of rapid prototyping Rapid Prototyping Journal, Vol. 5, nº4, 1999
- NYALUKE, A. P.; AN, D.; LEEP, H. R.; PARSAEI H. R. Rapid Prototyping: Applications in Academic Institutions and Industry 17th International Conference on Computers and Industrial Engineering - Computers ind. Engng, Vol.29, 1995
- KOCHAN, A. Rapid prototyping trends. MCB University Press, Rapid Prototyping Journal, Volume 3, nº 4, 1997
- ASHLEY, S. RP Industry's growing pains Mechanical Engineering Jul, 1998
- VOLPATO, N. Prototipagem rápida / ferramenta rápida no processo de desenvolvimento de produto. Revista Máquinas e Metais Jun, 1999

- LANGDON, R. A decade of Rapid Prototyping Automotive engineer Mai, 1997
- PHAM, D.T.; GAULT, R. S. Modeling for all occasions Manufacturing Engineer Dez, 1996
- PHAM, D.T.; GAULT, R. S. Solid Ideas Manufacturing Engineer Out, 1996
- AUBIN, R. F. Aworld Wide Assessment of Rapid Prototyping Technologies Solid Freeform Fabrication Symposium (5th): Proceedings Ago, 1994
- YAN, X.; GU, P. A review of rapid prototyping technologies and systems Computer-Aided Design, vol 28, n.º 4, 1996
- CHUA, C. K.; CHOU, S. M.; WONG T. S. A study of the State-of-the-Art Rapid Prototyping Technologies The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 14, 1998
- PAUL, K. B.; BASKARAN, S. Issues in fabricating manufacturing tooling using powder-based additive freeform fabrication Journal of Materials Processing Technology 61, 1996
- XU, F.; LOH, H. T.; WONG, Y. S. Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems Rapid Prototyping Journal Volume 5, n.º 2 MCB University Press, 1999
- HUBINGER, A. Z.; CARVALHO, J.; LIRANI, J. Rapid Prototyping - Concepts, Techniques, Applications and Future Trends Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM 99 Nov, 1999

- CAMPBELL, R. I.; BERNIE, M. R. N. Creating a Database of Rapid Prototyping System Capabilities Journal of Materials Processing Technology 61, 1996
- HOCK, S.; KNEISEL, T. A prototipagem rápida é o caminho mais curto para a fabricação de peças. São Paulo, Aranda Editora Técnica Ltda., Revista Máquinas e Metais, Ano XXXV, n.º 398 Jul, 1996
- CONLEY, J. G.; MARCUS, H. L. Rapid Prototyping and Solid Free Form Fabrication Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119 Nov, 1997
- COMB, J. Stratasys FDM speed and accuracy (How the latest developments affect the state-of-the-art and path for the future) Stratasys Inc. (www.udri.dayton.edu/rpdl/papers.htm) Mai, 1996
- WOHLERS, T. Rapid Guide to Rapid Prototyping. Minneapolis, Wohlers Associates, Inc., 1996
- PHAM, D.T.; GAULT, R. S. A comparison of rapid prototyping technologies International Journal of Machine Tools & Manufacture, 38 Design, Research and Application, 1998
- DICKENS, P. M. Research developments in rapid prototyping Part B: Journal of Engineering Manufacture - Proc Instn Mech Engrs Vol 209 Set, 1994
- ASHLEY, S. Rapid prototyping is coming of age Mechanical Engineering Jul, 1995
- WOHLERS Rapid Prototyping, Rapid Progress Manufacturing Engineering Jul, 1994

- WOHLERS, T. Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry: 1998 World Wide Progress Report. Fort Collins, Wohlers Associates, Inc., 1998
- NETTO, A. B. Prototipagem rápida agiliza o desenvolvimento de produtos Revista Metal-Mecânica Ago/Set, 1999
- KRUTH, J. -P.; LEU, M., C.; NAKAGAWA, T. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. Annals of the CIRP Vol. 47/2, 1998
- JEE, H.; SACHS, E. Surface macro-texture design for rapid prototyping Rapid Prototyping Journal, Vol. 6, n.º 1, 2000
- YOGUI, R.; OTÊNIO, D. Do Projeto à Prototipagem. São Paulo, CADware@Publishing & Internet, Revista Cadware Technology, Ano III, n.º 10 Nov/Dez, 1998
- BYLINSKY, G. Industry's Amazing Instant Prototypes. Fortune Jan, 1998
- KOCHAN, D.; KAI, C. C.; ZHAOHUI, D. Rapid prototyping issues in the 21st century Computers in Industry, 39 -, 1999
- 3. Estudo dos materiais empregados**
- CHEAH, C. M.; FUH, J. Y. H.; NEE, A. Y. C.; LU, L. Mechanical characteristics of fiber-filled photo-polymer used in stereolithography Rapid Prototyping Journal, Vol. 5, n.º 3, 1999

- KARIS, T. E.; DAWSON, D. J.; DAVIS, C. R.; KONO, R. -N.; KIM, G.; JHON, M. S.; KIM, S. J. Rapid Prototyping Materials Rheology. Journal of Imaging Science and Technology Volume 40, n.º 2 Mar/Abri, 1996
- MILEWSKI, J. O.; DICKERSON, P. G.; NEMEC, R. B.; FONSECA, J. C. Application of manufacturing model for the optimization of additive processing of Inconel alloy 690. Journal of Materials Processing Technology, 91, 1999
- WANG, G.; KRSTIC, V. D. Rapid prototyping of ceramic components - Review. Journal of the Canadian Ceramic Society, Vol. 67, n.º 3 Out, 1998
- KÖNIG, W.; CELIKER, T.; SONG, Y. -A. Rapid Prototyping of Metallic parts. Fraunhofer - Institut für Produktionstechnologie - IPT Steinbachstraße 17 D-52074AACHEN Germany, 1994
- KILLANDER, L. A.; SOHLENIUS, G. Future Direct Manufacturing of Metal Parts with Free-Form-Fabrication. Annals of the CIRP Vol. 44/1, 1995
- NAKAZAWA, H.; ISHIKAWA, M.; MATSUMOTO, Y. Rapid Prototyping by Free Sintering Method (1st Report) - Fundamental study, 1998
- 4. Projeto e RP**
- HVAM, L. The Rulers Factory - a Tool for Learning Product Modeling Techniques. Computers ind. Engng Vol. 35, n.ºs 1-2, 23rd International Conference on Computers and Industrial Engineering, 1998

- THOMKE, S. H. Managing Experimentation in the Design of New Products. Management Science, v. 44, n. 6 Jun, 1998
- WILLIAMS, R. E.; MELTON, V. L. Abrasive flow finishing of stereolithography prototypes Rapid Prototyping Journal, Vol. 4, n. 2, 1998
- LOOSE, K.; NIINO, T.; NAKAGAWA, T. Raster-based exposure through multiple parallel beams in stereolithography Rapid Prototyping Journal, Vol. 5, n. 3, 1999
- WILLIAMS, R. E.; KOMARAGIRI, S. N.; MELTON, V. L.; BISHU, R. R. Investigation of the effect of various build methods on the performance of rapid prototyping (stereolithography) Journal of Materials Processing Technology 61, 1996
- JURRENS, K. K. Standards for the rapid prototyping industry Rapid Prototyping Journal, Vol. 5, n. 4, 1999
- KIM, J. Y.; LEE, K.; PARK, J. C.; JUNG, Y. H. Efficient Calculation of Trapped Volumes in the Layered Manufacturing Process The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 14, 1998
- HUR, J.; LEE, K. The Development of a CAD Environment to Determine the Preferred Build-up Direction for Layered Manufacturing The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 14, 1998
- KRAUSE, F.-L.; CIESLA, M.; STIEL, Ch.; ULBRICH, A. Enhanced Rapid Prototyping for Faster Product Development Processes Annals of the CIRP Vol. 46/1, 1997

KULKARNI, P.; MARSAN, A.; DUTTA, D. A review of process

planning techniques in layered manufacturing Rapid Prototyping Journal,

Vol. 6, n.º 1, 2000

RAPLEE, J. DFMA to RP, ASAP: Design to manufacture and

rapid prototyping both seek the same prize: a better product made faster

Mechanical Engineering Set, 1999

LEFARTH, U.; BAUM, U.; BECK, T.; WERTHER, K.; ZURAWKA, T.

An integrated approach to rapid product development for embedded

automotive control systems Control Engineering Practice, 6 Fev, 1998

5. Ferramental Rápido

FRITZ, B.; NOORANI, R. Conformação de materiais utilizando

ferramental rápido Revista Máquinas e Metais Dez, 1999

ASHLEY, S. From CAD art to rapid metal tools Mechanical

Engineering Mar, 1997

DVORAK, P. Here comes rapid tooling Machine Design Jul, 1998

ARONSON, R. B. Toolmaking Through Rapid Prototyping

Manufacturing Engineering Nov, 1998

KARAPATIS, N. P.; GRIETHUYSEN, J. -P. S.; GLARDOW, R.

Direct rapid tooling: a review of current research. Rapid Prototyping

Journal, Volume 4, n.º 2, 1998

KAI, C. C.; HOWE, C. T.; HOE, E. K. Integrating Rapid

Prototyping and Tooling with Vacuum Casting for Connectors. The

International Journal of Advanced Manufacturing Technology 14, 1998

PHAM, D.T.; DIMOV, S.; LACAN, F. Techniques for firm tooling

using rapid prototyping Proc Instn Mech Engrs Vol 212 Part B, 1998

ZHOU, J. G.; HE, Z. Rapid pattern based powder sintering

technique and related shrinkage control Materials and Design 19, 1998

JACOBS, P. F. Quickcast™ 1.1 & Rapid Tooling 3D System

Corporation

RADSTOK, E. Rapid tooling Rapid Prototyping Journal, Vol. 5, nº4,

1999

“ARTIGOS” SOBRE PROJETO

MASSARANI, M.; MATTOS, F. C. A Engenharia do Valor no

Desenvolvimento Contínuo de Produtos VII Congresso e Exposição

Internacionais da Tecnologia da Mobilidade - Society of Automotive Engineers,

Inc Nov, 1998

SOHLENIUS, G. Concurrent Engineering Annals of the CIRP Vol.

41/2, 1992

- RIEDEL, J. C. K. H.; PAWAR, K. S. The consideration of production aspects during product design stages Integrated Manufacturing Systems 8/4, 1997
- GROTE, K.; WALO, M. L.; MILLER, J. L. Manufacturing and product development in the USA, in particular in Los Angeles Basin and the strategic training and implementation of high manufacturing technology MCB University Press, Integrated Manufacturing Systems 9/4, 1998
- TIDD, J.; BESSANT, J.; PAVITT, K.. Managing Innovation: integrating, market, and organizational change. Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 1997
- XU, D. Towards an object-oriented logic framework for knowledge based systems Knowledge-Based Systems 10, 1998
- KAMINSKI, P. C.. Notas de aula da disciplina Projeto Integrado de Sistemas Mecânicos – PMC5805. São Paulo, EPUSP, 1998
- ASIMOW, M. Introdução ao Projeto. São Paulo, Editora Mestre Jou, 1968
- ALTING, L.; LEGARTH, J. B. Life Cycle Engineering and Design Annals of the CIRP, vol. 44/2, 1995
- The missing link Automotive engineer Out, 1998
- TOLEDO, N. N.. Metodologia para o desenvolvimento de produtos para serem fabricados em série. Tese de Doutorado da Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, 1994

ALGUNS SITES RECOMENDADOS:

[www.cc.utha.edu/~asn8200/rapid.html*](http://www.cc.utha.edu/~asn8200/rapid.html)

[www.wohlersassociates.com*](http://www.wohlersassociates.com)

[www.cimject.ufsc.br*](http://www.cimject.ufsc.br)

www.stratays.com

www.dtm-corp.com

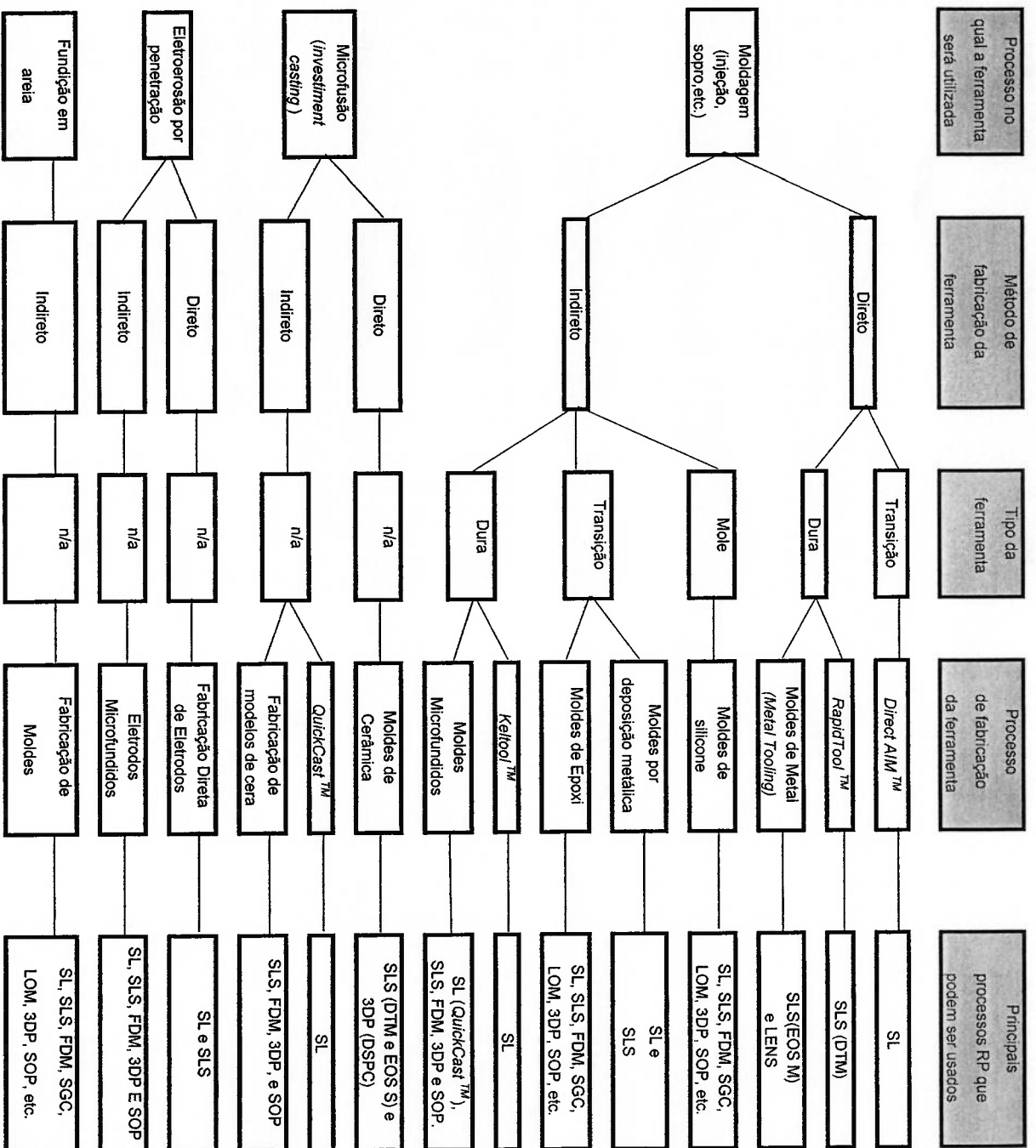
www.3dsystems.com

www.cubital.com

www.helysis.com

www.jpssystem5.com

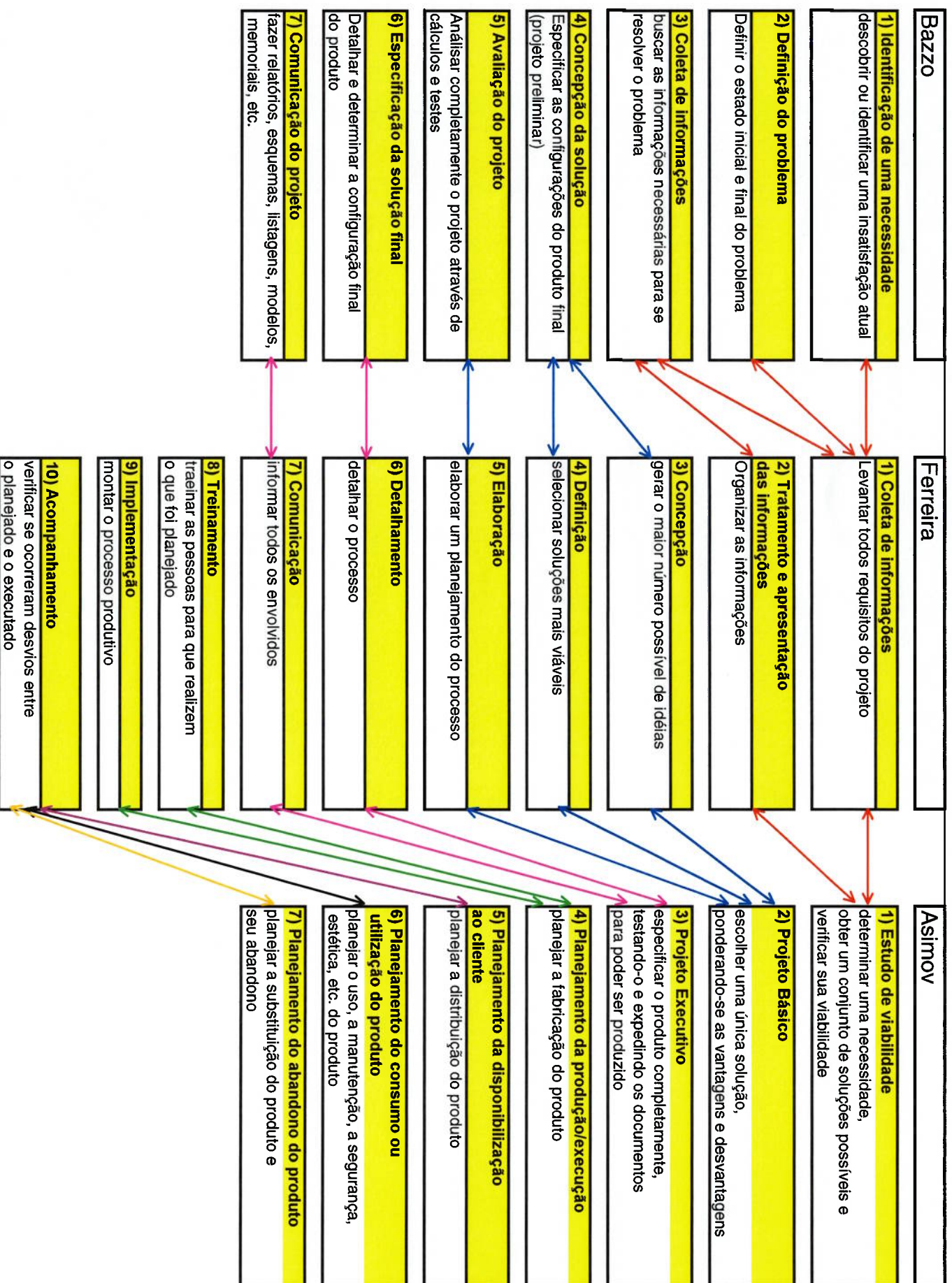
Os três primeiros sites possuem vários links interessantes.



FONTES: GOMIDE (2000)

NOTA: n/a = não se aplica

ANEXO C: Comparação dos processos de projeto



APÊNDICE

QUESTIONÁRIO UTILIZADO PARA ENTREVISTAS NAS EMPRESAS

Questionário sobre a utilização da prestação de

serviços de Prototipagem Rápida na elaboração de produtos.

1. Ramo de atividade da empresa _____

Automobilístico

Aeronáutico

Eletrodoméstico

Brinquedos

Outro: _____

2. Nº de funcionários total: _____

Menos de 20

Entre 20 e 100

Entre 100 e 500

De 500 a 1000

Acima de 1000

3. Nº de funcionários envolvidos diretamente na área de projetos: _____

4. Faturamento anual: _____

- Abaixo de R\$ 100.000,00
- De R\$ 100.000,00 a 1.000.000,00
- De R\$ 1.000.000 a R\$ 2.500.000,00
- De R\$ 2.500.000,00 a R\$ 5.000.000,00
- Acima de R\$ 5.000.000,00

5. Quantidade de projetos de desenvolvimento de produtos em andamento

- Menos que 05
- De 5 a 20
- De 20 a 50
- De 50 a 100
- Acima de 100

6. Quantidade de projetos desenvolvidos com o auxílio da prototipagem rápida

- Menos que 05
- De 5 a 20
- De 20 a 50
- De 50 a 100
- Acima de 100

Como conheceu a tecnologia (recorreu à Robtec, Flag etc)?

- Propaganda em revista comercial
- Publicação em revista científica
- Feiras
- Congressos / Simpósios
- Outros: _____

12. Qual a porcentagem de protótipos Funcionais (para testes de resistência) que a empresa encomenda?

11. Quais dos sistemas acima não conhecia?

10. Porque?

- SL
- FDM
- LOM
- SLS
- Outro: _____

9. Qual o sistema preferido pela empresa?

8. O serviço é "pago" pela economia de custo / tempo? De quanto seria essa economia (em porcentagem)?

7. Desde quando utiliza a tecnologia? _____

13. Qual é a qualidade destes protótipos incluindo pós-processamento (notas A, B, C ou

D)

Precisão dimensional

Resistência mecânica

Durabilidade

Rugosidade

14. Qual a porcentagem de protótipos *Modelos conceituais* (visualização) que a empresa

encomenda?

15. Qual é a qualidade destes protótipos incluindo pós-processamento (notas A, B, C ou

D)

Precisão dimensional

Resistência mecânica

Durabilidade

Acabamento superficial

Rugosidade

16. Qual a porcentagem de protótipos *Padrão para fundição* que a empresa encomenda?

17. Qual é a qualidade destes protótipos incluindo pós-processamento (notas A, B, C ou

D)

Precisão dimensional

Resistência mecânica

Durabilidade

Rugosidade

18. Qual a porcentagem de protótipos *Padrão para ferramenta* que a empresa

recomenda?

19. Qual é a qualidade destes protótipos incluindo pós-processamento (notas A, B, C ou

D)

Precisão dimensional

Acabamento superficial

Resistência mecânica

Durabilidade

Rugosidade

20. Que outras utilizações mais específicas (em porcentagem) fazem a empresa de protótipos RP? _____

21. Qual é a qualidade destes protótipos incluindo pós-processamento (notas A, B, C ou

D)

Precisão dimensional

Resistência mecânica

Durabilidade

Rugosidade

22. Acima (se for o caso de a empresa utilizar várias tecnologias) especificar qual

sistema RP é o melhor para cada caso.

23. Limitações encontradas/satisfação:

24. Melhorias sugeridas:

25. Testes que possibilita

Encaixe / Montagem

Resistência mecânica

Ergonomia

Funcional (teste de campo)

Túnel de vento

26. Como os testes realizados são analisados?

27. Em que etapas do projeto a empresa costuma recorrer à prestadora de serviço?

Estudo de viabilidade

Projeto básico

Projeto executivo

Planejamento da produção

Planejamento da distribuição/montagem

28. Há maior integração entre equipes de trabalho (marketing, por exemplo)?

Sim

Não

29. Qual o tempo de espera para a obtenção de um protótipo? _____

30. A RP acrescenta qualidade ao produto?

Sim

Não

31. Aumenta a capacidade criativa dos projetos?

Sim

Não

32. Qual seria o fluxograma de desenvolvimento padrão: (sugestões abaixo)

- Design*
- Componentes mecânicos
- Estrutura
- Fabricação
- Distribuição / Embalagem
- Componentes elétricos
- Controladores de acionamento / funcionamento
- Escolha de materiais
- Propaganda e Marketing

33. Em quais etapas destas etapas acima, a empresa utiliza protótipos (RP)?