

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROPOSTA DE SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES DE PROJETO DE
COMPONENTES MOLDADOS POR INJEÇÃO AUXILIADA POR PROTÓTIPOS FÍSICOS**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

AURÉLIO DA COSTA SABINO NETTO

Florianópolis, setembro de 2003

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

PROPOSTA DE SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES DE PROJETO DE
COMPONENTES MOLDADOS POR INJEÇÃO AUXILIADA POR PROTÓTIPOS FÍSICOS

AURÉLIO DA COSTA SABINO NETTO

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr.
Orientador

Prof. André Ogliari, Dr.
Co-orientador

José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr.
Coordenador PosMec

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fernando Antonio Forcellini, Dr.
Presidente

Prof. Nelson Back, Dr.

Prof. Gean Vitor Salmoria, Dr.

Em memória de meu pai, **Maurélio da Costa Sabino**. Participativo e engenhoso...

Insubstituível...

AGRADECIMENTOS

Ao **Prof. Carlos Henrique Ahrens** pela amizade, pela orientação deste trabalho e por contribuir para minha formação desde os tempos de iniciação científica.

Ao **Prof. André Ogliari** pela co-orientação e inúmeras contribuições que enriqueceram meu trabalho.

Aos membros da banca **Profs. Fernando Antonio Forcellini, Nelson Back e Gean Vitor Salmória** pelas pertinentes sugestões de melhoria.

Aos companheiros pós-graduandos, **Foggiatto, Diovani, Malone, Lafratta, Batata, Janaina, Mathias, Felix, Wesley, Armando, Alan, Badotti e Busato**, e estagiários, **Fraga, Fred, Anderson, Pereira, Clauber, Bruno Camotti, Bruno Alcântara, William, Déborah e Cristiano**, pelo companheirismo e ambiente descontraído de trabalho.

Aos também amigos **Diogo e Fernando** que foram parceiros no desenvolvimento do preendedor.

Aos **professores e funcionários** do departamento de engenharia mecânica.

Ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq** pelo financiamento concedido.

À minha namorada **Raquel** pelo amor, carinho e incentivo.

À minha **família**, principalmente, à minha mãe **Zelia** por tudo e mais um pouco.

RESUMO

Os componentes de plástico moldados por injeção têm sido adotados freqüentemente para a produção em massa de produtos de uso por apresentarem vantagens econômicas e técnicas comparadas a outros processos de fabricação. Em contraposição a estas vantagens, está o normalmente longo tempo de desenvolvimento destes produtos que é um fator complicador para a redução do tempo de lançamento em mercados competitivos. Em função disto, diversas pesquisas têm sugerido a adoção de modelos de gerenciamento e de metodologias de projeto mais específicas para apoiar a tomada de decisões e acelerar a comunicação por parte da equipe de projeto. Nestas pesquisas, os protótipos físicos são considerados ferramentas de projeto fundamentais para que os objetivos propostos sejam alcançados, em especial os produzidos por técnicas de prototipagem rápida. Contudo, observa-se que as metodologias são normalmente desprovidas de um maior detalhamento, o que dificulta o desenvolvimento sistematizado do processo de avaliação de soluções de projeto auxiliadas por protótipos físicos. Neste trabalho é apresentada uma proposta de sistemática para o processo de avaliação de soluções de projeto contemplando cinco etapas consideradas necessárias: *identificação dos testes e determinação parâmetros de avaliação, planejamento do teste, confecção do protótipo do componente, execução do teste e preparação e análise dos resultados*. A constituição da proposta foi baseada em um modelo de referência para o desenvolvimento integrado de componentes de plástico injetados e fundamentada em dois estudos de caso que contemplaram o desenvolvimento de produtos com auxílio de diferentes tipos de protótipos físicos na fase de projeto preliminar. Espera-se desta forma, que a sistematização proposta possa colaborar para que o processo de avaliação seja realizado de forma eficiente e criterioso, possibilitando a elaboração de produtos de melhor qualidade em menor espaço de tempo.

Palavras-chave: Desenvolvimento de produtos, protótipos físicos, Prototipagem rápida e Moldagem por injeção.

TITLE & ABSTRACT

SYSTEMATIC PROPOSAL FOR DESIGN SOLUTIONS EVALUATION OF INJECTION MOLDED PLASTIC PARTS AIDED BY PHYSICAL PROTOTYPES

The injection molded plastic parts have usually been adopted for mass production of products, as they present economical and technical advantages, compared with other manufacture processes. Despite that, these parts require normally a long development time, which is a negative issue for the reduction of time-to-market in competitive markets. Because of that, many researchers have suggested the adoption of some more specific management models and project methodologies to support decision-making and to accelerate the communication within the design team. In these researches, physical prototypes are considered a fundamental design tool to achieve the planned objectives, especially those produced via rapid prototyping processes. However, the proposed methodologies do not have the necessary detailing, which makes difficult the systematized development of design solutions evaluation process using physical prototypes. In this work there is presented a systematic that consists of five basic stages: **test identification and evaluation parameter definition, test planning, prototype fabrication, test performing and preparation and analysis of the results**. The establishment of this proposal was based on reference model for integrated development and in two case studies of plastic parts development supported by physical prototypes in embodiment design stage. The expectation is that the use of this systematic aids the evaluation process to be more effective and reliable which enables the production of high quality products in a shorter development time.

Key-words: Product development, physical prototypes, rapid prototyping, design evaluation and injection molding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Ciclo de vida hipotético de um produto (adaptada de Back e Forcellini [3]).....	19
Figura 2-1: Fases do processo de projeto de produtos abordadas pelas metodologias de projeto	25
Figura 2-2: Fases do desenvolvimento de componentes moldados por injeção e suas subdivisões (adaptada de Daré [2])	26
Figura 2-3: Etapa de projeto preliminar de componentes de plástico injetados [2]	28
Figura 2-4: Etapa de projeto preliminar de componentes de plástico injetados (continuação) [2]	29
Figura 2-5: Disposição de alguns tipos de protótipos considerando simultaneamente as duas dimensões de classificação (adaptada de Ulrich e Eppinger [11])	31
Figura 2-6: Tipos de protótipos usualmente empregados para diferentes categorias de produção (adaptado de Pahl e Beitz [20])	32
Figura 2-7: Protótipo físico produzido por estereolitografia (cortesia DSM SOMOS)	33
Figura 2-8: Análise de tensões em um protótipo virtual	34
Figura 2-9: Estimativa mundial anual da quantidade de protótipos rápidos produzidos [24]	35
Figura 2-10: Resultado da pesquisa mostrando a relação entre o tipo de protótipo e a fase do processo de projeto. Adaptado de Pache, et alii [25]	37

Figura 2-11: Representação simbólica da barreira que é formada entre setores de projeto e fabricação na forma seqüencial de desenvolvimento de produtos [27].....	38
Figura 2-12: Evolução dos custos de modificação ao longo do ciclo de vida dos produtos. (adaptada de Back e Forcellini [3])	39
Figura 2-13: Comparação esquemática entre o desenvolvimento seqüencial e simultâneo do processo de projeto	40
Figura 2-14: Representação esquemática dos diferentes tipos de testes realizados no desenvolvimento de produtos (adaptada de Blanchard e Fabryky [30] e Back e Forcellini [3])	41
Figura 3-1: Principais processos e fabricantes de máquinas de prototipagem rápida distribuídos de acordo com o ano de surgimento no mercado.....	50
Figura 3-2: Ciclo genérico no processo por adição de camadas.....	52
Figura 3-3: Ilustração esquemática do efeito escada.....	52
Figura 3-4: Principais usos dos protótipos rápidos (adaptada de Wohlers [24])	53
Figura 3-5: Esquema básico do processo de estereolitografia da 3DSystems	56
Figura 3-6: Esquema básico do processo de sinterização a laser, adaptada de [49]	60
Figura 3-7: Esquema básico do processo de fusão e deposição de materiais (adaptado de Efunda [51])	63
Figura 3-8: Protótipo conceitual produzido pelo processo 3DP, extraído de [44] ...	67
Figura 3-9: Gráfico comparativo entre os processos SL, SLS, FDM e 3DP	68
Figura 3-10: Esquema do processo de obtenção de protótipos através de moldes de silicone.....	70
Figura 3-11: Esquema do processo de obtenção de moldes com silicone opaco	71

Figura 3-12: Esquema do processo de obtenção de protótipos através de moldes por deposição metálica.....	73
Figura 3-13: Representação dos insertos tipo sólido e em casca	76
Figura 3-14: Representação de insertos com canais de resfriamento incorporados	78
Figura 3-15: Gráfico comparativo entre os processos de fabricação de ferramental rápido	79
Figura 3-16: Participação dos processos no mercado brasileiro	81
Figura 3-17: Localização das máquinas no mercado brasileiro.....	82
Figura 4-1: Modelos 3D CAD das duas concepções do produto fornecidos pelo cliente	85
Figura 4-2: Plano de projeto para fabricação dos protótipos em ferramental rápido	86
Figura 4-3: Resultado de distribuição pressão realizada em sistema CAE.....	88
Figura 4-4: Modelo 3D CAD do conjunto (inserto e posições) e vista explodida	89
Figura 4-5: Foto dos insertos montados no porta-moldes.....	90
Figura 4-6: Protótipo resultante da moldagem nos moldes SL	90
Figura 4-7: Ilustração esquemática do conjunto conexão e lacre	92
Figura 4-8: Matriz da casa da qualidade do produto.....	97
Figura 4-9: Exemplos de prendedores presentes no mercado	99
Figura 4-10: Esboço esquemático da solução adotada	100
Figura 4-11: Matriz da casa da qualidade do componente.....	101
Figura 4-12: Carta de seleção de materiais para molas pelo critério da mínima massa. Adaptada de Ashby [61]	103
Figura 4-13: Modelos em espuma.....	105

Figura 4-14: Avaliação ergonômica preliminar	105
Figura 4-15: Modelo 3D CAD simplificado	106
Figura 4-16: Simulação de deslocamento em sistema CAE	107
Figura 4-17: Simulação da pressão de injeção em sistema CAE.....	108
Figura 4-18: Modelo CAD de primeira iteração de projeto	108
Figura 4-19: Teste do produto com auxílio de protótipos rápidos.....	110
Figura 4-20: Modelo CAD modificado após a avaliação com protótipos rápidos	112
Figura 4-21: Uso de diferentes protótipos na fase de projeto preliminar	114
Figura 5-1: Parcela do modelo de referência que estará contida na sistemática (adaptado de Daré [2])	117
Figura 5-2: Significado dos símbolos adotados nos fluxogramas que ilustram a proposta	118
Figura 5-3: Fluxograma da sub-tarefa determinação dos parâmetros de teste.....	120
Figura 5-4: Questionário para investigar a viabilidade técnica	122
Figura 5-5: Fluxograma da sub-tarefa planejamento do teste	124
Figura 5-6: Fluxograma da sub-tarefa confecção do protótipo do componente....	127
Figura 5-7: Fluxograma da sub-tarefa execução do teste	130
Figura 5-8: Fluxograma da sub-tarefa preparação e análise dos resultados e deliberações para o projeto	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Principais compradores de máquinas de prototipagem rápida [24]. ...	80
Tabela 4-1: Condições de processamento para os termoplásticos utilizados	91
Tabela 4-2: Matriz morfológica textual.....	100
Tabela 4-3: Principais propriedades do polipropileno H-301 (extraído de Braskem [62])	104
Tabela 4-4: Comparação entre as principais propriedades do PP H-301 e Sl 7110 (extraídos de Braskem [62] e DSM Somos [65])	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- 3D - Tridimensional
- 3DP - *Three Dimensional Printing* (Impressão Tridimensional)
- ABS - Acrilonitrila Butadieno Estireno
- ACES - *Acurate Clear Epoxy Solid*
- AIM - *ACES Injection Molding*
- CAD - *Computer Aided Design* (Projeto Assistido por Computador)
- CAE - *Computer Aided Engineering* (Engenharia Assistida por Computador)
- CAM - *Computer Aided Manufacturing* (Manufatura Assistida por Computador)
- CO₂ - Dióxido de Carbono
- FDM - *Fused Deposition Modeling* (Modelagem por Fusão e Deposição)
- GRP - Grupo de Prototipagem Rápida
- PEAD - Polietileno de alta densidade
- He-Cd - Hélio-Cádmio
- IRC - Índice de Reclamações dos Consumidores
- PEBD - Polietileno de Baixa Densidade
- LENS - *Laser Engineered Net Shaping*
- LOM - *Laminated Object Manufacturing*
- MJM - *Multi-Jet Modeling*
- NC - *Numerical Control* (Controle Numérico)
- PA - Poliamida
- PC - Policarbonato
- PE - Polietileno

- PET - Polietileno-tereftalato
- PLT - *Paper lamination technology*
- PMMA - Polimetacrilato de Metila
- PP - Polipropileno
- PS - Poliestireno
- PVC - Policloreto de vinila
- RP - *Rapid Prototyping* (Prototipagem Rápida)
- RT - *Rapid Tooling* (Ferramental Rápido)
- RTV - *Room Temperature Vulcanization* (Vulcanização à Temp. Ambiente)
- SL - *Stereolithography* (Estereolitografia)
- SLA - *Stereolithography Apparatus* (Aparato de Estereolitografia)
- SLS - *Selective Laser Sintering* (Sinterização Seletiva a Laser)
- STL - *Stereolithography Tessellation Language*

LISTA DE SÍMBOLOS

M_1	- Critério para escolha de material de molas com mínimo volume	[MJ/m ³]
M_2	- Critério para escolha de material de molas com mínima massa	[kJ/kg]
ρ	- Densidade específica	[g/m ³]
E	- Módulo de elasticidade	[GPa]
σ_f	- Tensão de resistência máxima	[MPa]
T_g	- Temperatura de transição vítrea	[°C]

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	18
1.1 Caracterização e justificativa.....	18
1.2 Objetivos da dissertação.....	21
1.3 Conteúdo da dissertação.....	22
CAPÍTULO 2 - PROTÓTIPOS NO DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES MOLDADOS POR INJEÇÃO.....	24
2.1 Metodologia de projeto de componentes moldados por injeção.....	24
2.2 Protótipo: Definição e classificação.....	29
2.3 Importância do uso de protótipos no desenvolvimento de componentes moldados por injeção.....	31
2.4 Prototipagem no ambiente de engenharia simultânea	37
2.5 Tipos de testes com protótipos no processo de projeto.....	40
2.5.1 Testes com protótipos físicos de componentes moldados por injeção na fase de projeto preliminar	44
CAPÍTULO 3 - PROCESSOS PARA A FABRICAÇÃO RÁPIDA DE PROTÓTIPOS.....	49
3.1 Generalidades	49
3.2 Vantagens e desvantagens dos processos para a fabricação rápida de protótipos	53
3.3 Processos de produção em máquinas de prototipagem rápida	55
3.3.1 Estereolitografia (SL)	55
3.3.2 Sinterização seletiva a laser (SLS)	59

3.3.3	Modelagem por fusão e deposição (FDM).....	62
3.3.4	Modeladores conceituais	65
3.3.5	Comparação entre os processos de fabricação rápida de protótipos .	67
3.4	Processos de produção de protótipos por ferramental rápido.....	68
3.4.1	Processos indiretos	69
3.4.2	Processos diretos	75
3.4.3	Comparação entre os processos de fabricação por ferramental rápido	78
3.5	Prototipagem rápida no Brasil	79
CAPÍTULO 4 - ESTUDOS DE CASO.....		84
4.1	Estudo de caso 1	84
4.1.1	Desenvolvimento do ferramental rápido	86
4.1.2	Comentários relativos ao estudo de caso 1	93
4.2	Estudo de caso 2	95
4.2.1	Projeto informacional do componente	95
4.2.2	Projeto conceitual.....	97
4.2.3	Projeto preliminar.....	101
4.2.4	Comentários relativos ao estudo de caso 2	112
4.3	Diretrizes para a elaboração da sistemática	115
CAPÍTULO 5 - SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES DE PROJETO .		117
5.1	Estrutura da proposta	118
5.2	Identificação dos testes e determinação dos parâmetros de avaliação...	119

5.3	Planejamento do teste	124
5.4	Confecção do protótipo do componente.....	127
5.5	Execução do teste	130
5.6	Preparação e análise dos resultados e deliberações para o projeto	131
5.7	Adaptação a outro modelo de referência	132
CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS		134
6.1	Conclusões	134
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	138
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		139
APÊNDICES.....		145
Apêndice A	- Lista de fornecedores de protótipo rápido no Brasil	146
Apêndice B	- Modelo de relatório de acompanhamento de teste	147
Apêndice C	- Fluxograma completo da sistemática	148
ANEXOS		149
Anexo A	- Exemplo de modelo econômico hipotético para a análise de viabilidade do teste.....	150
Anexo B	- Parâmetros recomendados para a exportação no formato stl	151
Anexo C	- Questionário estruturado típico de projeto [67]	153

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização e justificativa

Da metade até o final do século passado se observou uma mudança significativa na economia mundial. Logo após a segunda grande guerra, a demanda superava a oferta promovendo o reaquecimento da economia e a formação de grandes corporações. Com o passar dos anos, este desequilíbrio foi diminuindo gradativamente até que em meados dos anos 70, a oferta sobrepunha a demanda. Esta inversão foi motivada pela saturação dos mercados e levou empresas a buscarem o desenvolvimento tecnológico e gerencial [1].

O atual estado em que se encontra o mercado mundial de bens de consumo, em particular o brasileiro, é altamente competitivo. Aliada às mudanças da economia, a abertura do mercado mundial vem acirrando as disputas comerciais entre as empresas. Como consequência podem ser destacadas a redução do tempo de lançamento de produtos no mercado e o encurtamento da vida útil dos produtos [1] [2].

O tempo de lançamento de produto, referente a parte localizada à esquerda do eixo vertical da figura 1-1, engloba desde o momento em que uma empresa decide desenvolver um produto até o momento em que o mesmo é disponibilizado para o mercado. Na maior parte das vezes, a empresa pioneira no lançamento poderá desfrutar, mais cedo e por mais tempo, de largas margens de lucro, terá maior participação no mercado e comparada aos concorrentes, contará com o produto por mais tempo no mercado até que este entre em obsolescência na etapa do ciclo de vida conhecida como declínio. Estas vantagens proporcionarão recursos

adicionais para a evolução do produto em questão e investimentos em novos produtos [1].

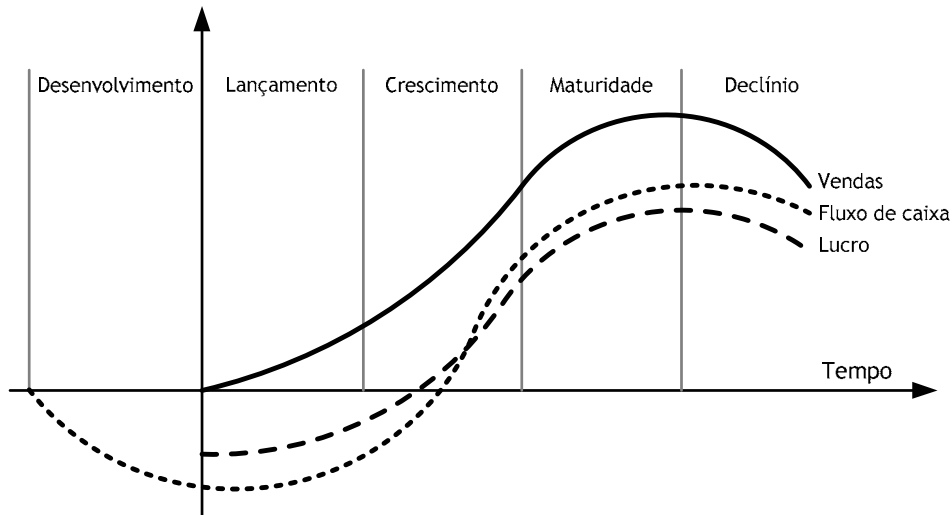


Figura 1-1: Ciclo de vida hipotético de um produto (adaptada de Back e Forcellini [3])

Num período não muito distante, os produtos podiam ser concebidos tendo como um dos principais atributos a alta durabilidade, diferente da situação atual onde apresentam uma vida útil menor que proporciona uma rotatividade maior do consumo, evitando desta forma a estagnação dos mercados consumidores [4]. A redução da vida útil, em parte, é proporcionada pelos próprios consumidores que se mostram ávidos por inovações tecnológicas, *design* atualizado e baixo custo de aquisição [5]. Neste caso, as empresas que não conseguem suprir as necessidades dos consumidores tendem diminuir sua participação no mercado.

Nesta conjuntura se enquadram os produtos que possuem componentes de plástico moldados por injeção. Os componentes de plástico se mostram soluções geralmente econômicas, eficientes e precisas, vantagens que proporcionaram o crescimento e a utilização destes para a produção em massa de produtos nos setores mais competitivos da indústria, como por exemplo, o automobilístico e o de eletrodomésticos [6]. Apesar disso, o processo de moldagem por injeção tem um

tempo de desenvolvimento normalmente longo. Somente o tempo necessário para o projeto e fabricação do ferramental que é um item essencial, pode levar em torno de 2 a 6 meses, dependendo da complexidade geométrica do componente [7]. Isto evidencia a importância que deve ser dada a métodos que visem reduzir o tempo de desenvolvimento destes produtos, o que tornaria as empresas deste setor mais competitivas.

Smith e Reinertsen [8] destacam que uma equipe de projeto além do tempo de desenvolvimento trabalha simultaneamente com outras três variáveis: custo de desenvolvimento, custo do produto e qualidade do produto. Estas quatro variáveis não podem ser consideradas de forma isolada. É necessário, muitas vezes, encontrar soluções de compromisso, como por exemplo: até que ponto pode-se acelerar o desenvolvimento sem prejudicar a qualidade e os limites de custo de um projeto. Assim, torna-se imprescindível que a equipe de projeto disponha de indicações confiáveis do desempenho do componente nas fases iniciais do processo de projeto onde os custos de modificação são geralmente menores, além do comprometimento de uma pequena parcela do orçamento de desenvolvimento.

As metodologias focadas no desenvolvimento acelerado de produtos apontam os testes com protótipos físicos para a avaliação de soluções de projeto como uma alternativa fundamental para que as metas de qualidade e custos não sejam negligenciadas [8] [9]. No entanto com uma visão abrangente ao nível de produto, pois não detalham como isto poderia ser realizado ao nível de componentes. No modelo de referência para o desenvolvimento integrado de componentes de plástico injetados, Daré [2] abordou de forma geral as etapas de desenvolvimento de componentes moldados por injeção, desde o levantamento de informações de mercado até a aprovação do lote piloto. Na etapa de projeto preliminar do

componente o autor também se refere ao emprego de protótipos físicos para testar funcionalidade das soluções de projeto adotadas. Contudo a forma com que o trabalho foi proposto não permitiu que esta e outras tarefas alcançassem um maior detalhamento.

Alguns dos testes que são propostos demandam a construção de protótipos com características particulares, como por exemplo, quando o teste a ser realizado demanda a elaboração de um objeto com características geométricas de difícil reprodução, ou seja, que requeira longo tempo para sua construção por meios convencionais de fabricação¹. Dentre as técnicas que procuram minimizar estas dificuldades se enquadram as denominadas de prototipagem rápida (RP). No entanto, observa-se que apesar destas técnicas estarem presentes no mercado brasileiro, não estão ao alcance de boa parte dos potenciais usuários. Observa-se que uma das razões para este mau aproveitamento é o desconhecimento por parte de muitos profissionais da área de projeto das potencialidades dessas técnicas já apresentadas na literatura especializada.

1.2 Objetivos da dissertação

Com base no exposto nos itens anteriores, propõe-se como objetivo geral desta dissertação de mestrado, elaborar uma proposta de sistemática para avaliação de soluções de projeto auxiliada por protótipos físicos, enfatizando os processos de prototipagem rápida, para aplicação no segmento de produtos de plástico moldados por injeção.

Não obstante, esta dissertação ainda apresenta os seguintes objetivos específicos:

¹ Métodos comumente usados pela indústria como a usinagem convencional.

- Desenvolver uma revisão bibliográfica reunindo informações referentes aos conceitos que serão abordados pela proposta de sistemática;
- Apresentar uma descrição sobre os processos de prototipagem rápida capazes de fabricar protótipos destinados a avaliar componentes moldados por injeção;
- Desenvolver estudos de caso envolvendo o desenvolvimento de componentes moldados, procurando identificar e detalhar as atividades, as entradas e as saídas de informações para a sustentação da proposta de sistemática;
- Detalhar a metodologia proposta por Daré [2] na sua dissertação de mestrado, relativamente às etapas de confecção do protótipo e de testes funcionais, inseridas na fase de projeto preliminar do processo de desenvolvimento de componentes de plástico moldados por injeção.

Adicionalmente, este trabalho deve prover num sentido geral um conjunto de orientações aos profissionais que lidam com desenvolvimento de produtos, capazes de auxiliar a seleção da técnica de prototipagem rápida (direta ou indireta) mais adequada para atender as necessidades e requisitos especificados para a realização de testes e posterior avaliação do protótipo.

1.3 Conteúdo da dissertação

Além deste capítulo, a presente dissertação contempla outros cinco. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito de protótipos no desenvolvimento de produtos moldados por injeção. Primeiramente, discute-se as metodologias de projeto existentes, com ênfase no modelo de referência proposto

por Daré [2] que servirá de base para a constituição da sistemática do Capítulo 5. Na seqüência do capítulo aborda-se a definição e classificação de protótipos, a importância e os tipos de testes realizados no desenvolvimento de produtos, em particular os testes realizados na etapa de projeto preliminar.

No Capítulo 3 discorre-se sobre os protótipos rápidos listando suas vantagens e desvantagens e como se realiza o processo de fabricação destes protótipos. Neste capítulo também são relacionados os principais processos de fabricação de protótipos e ferramental rápido para moldagem por injeção. Por fim, apresenta-se o estado da arte desta tecnologia no Brasil.

O Capítulo 4 apresenta dois estudos de caso relativos à aplicação de processos de prototipagem rápida pelas técnicas direta e indireta no desenvolvimento de produtos moldados por injeção que forneceram subsídios necessários para a formulação da proposta de sistemática do capítulo 5.

Baseada nas informações apresentadas nos capítulos anteriores, no Capítulo 5, é apresentada a proposta de sistemática para avaliação de soluções de projeto de componentes moldados por injeção auxiliados por protótipos físicos.

Finalmente, no Capítulo 6 apresentam-se as considerações finais do trabalho, na forma de uma análise crítica à sistemática proposta. Neste capítulo, além das conclusões finais do trabalho, são relacionadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - PROTÓTIPOS NO DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES MOLDADOS POR INJEÇÃO

2.1 Metodologia de projeto de componentes moldados por injeção

De maneira geral, o método de projeto constitui-se de uma seqüência de ações necessárias, dispostas em ordem racional, determinadas pela experiência [10]. Neste mesmo sentido, embora de forma particular, metodologia de projeto pode ser definida como um processo organizado e sistematizado que busca orientar a equipe de desenvolvimento de produtos [3]. Ulrich e Eppinger [11] consideram as metodologias de projeto importantes por três razões: primeiro, contribuem para que o processo decisório seja racional, evitando a continuação do projeto com informações não fundamentadas; segundo, funcionam como *checklists* assegurando que as etapas fundamentais foram executadas e terceiro, favorecem a documentação das atividades, estruturando um histórico que poderá ser utilizado pela equipe de projeto em desenvolvimentos futuros.

Existe na literatura especializada um número significativo de metodologias de projeto, cada qual com sua peculiaridade. Segundo Ogliari [12], as principais diferenças estão presentes na nomenclatura adotada e no nível de detalhamento que os autores conferem a cada etapa, mas, apesar disto, elas apresentam uma certa similaridade entre si. Em síntese, as metodologias apresentam quatro fases distintas para o processo de projeto de produtos, conforme pode ser observado na ilustração da figura 2-1.

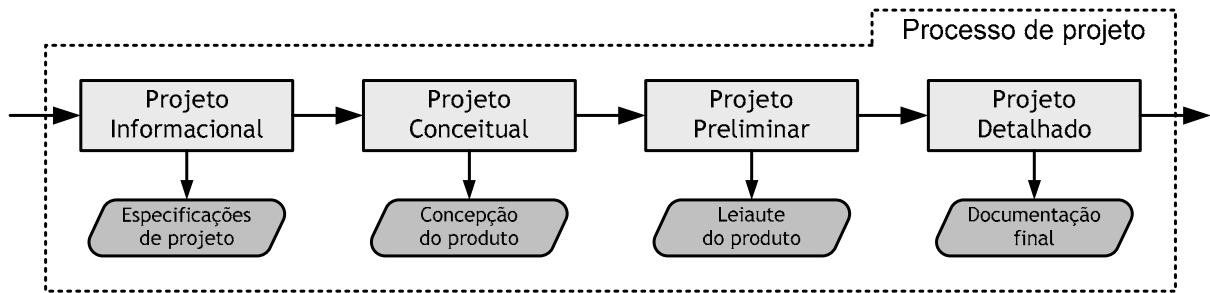


Figura 2-1: Fases do processo de projeto de produtos abordadas pelas metodologias de projeto

Na fase de **Projeto Informacional**² são levantados todos os dados relevantes para ter-se o completo entendimento do produto a ser concebido. As informações referentes ao mercado e aos clientes são traduzidas de forma que ao final desta fase, sejam estabelecidas as especificações de projeto. Com base nas especificações de projeto são propostas algumas alternativas de concepção, sendo escolhida a opção que melhor os atende. O resultado desta fase, **Projeto Conceitual**, é o primeiro esboço conceitual do produto. Na fase seguinte, a de **Projeto Preliminar**, o conceito torna-se mais concreto quando as questões técnicas e econômicas passam a ter uma maior importância no processo, uma vez que, por exemplo, são realizados os cálculos para dimensionamento, definição da forma, do material e dos processos que resultarão no leiaute do produto. Finalmente, na fase de **Projeto Detalhado**, realiza-se a convergência de todo o desenvolvimento, resultando na documentação final do projeto e no objeto do projeto, o produto.

É válido supor que a adoção de uma metodologia de projeto confere ao projetista orientação necessária na sua maneira de proceder e na escolha dos recursos mais adequados em determinadas situações de projeto. Entretanto, as metodologias propostas foram baseadas, em sua grande maioria, no projeto de sistemas técnicos, com pouca referência ao nível de componentes [2].

² Termo proposto por Hernandez Fonseca [13] em sua tese de doutorado.

Dessa constatação resultou a proposta de um modelo de referência para o processo de desenvolvimento de componentes de plástico moldados por injeção, sob a forma de dissertação de mestrado [2]. Na proposta, o autor desdobrou o processo de desenvolvimento em três fases distintas, **Projeto do Componente**, **Projeto e Fabricação do Molde** e **Planejamento do Processo de Produção**, conforme ilustra a figura 2-2. Além disso, cada etapa pertencente às fases do processo de desenvolvimento está representada na forma de fluxograma contendo: as entradas para cada etapa, as tarefas correspondentes, os documentos de projeto e as saídas esperadas.

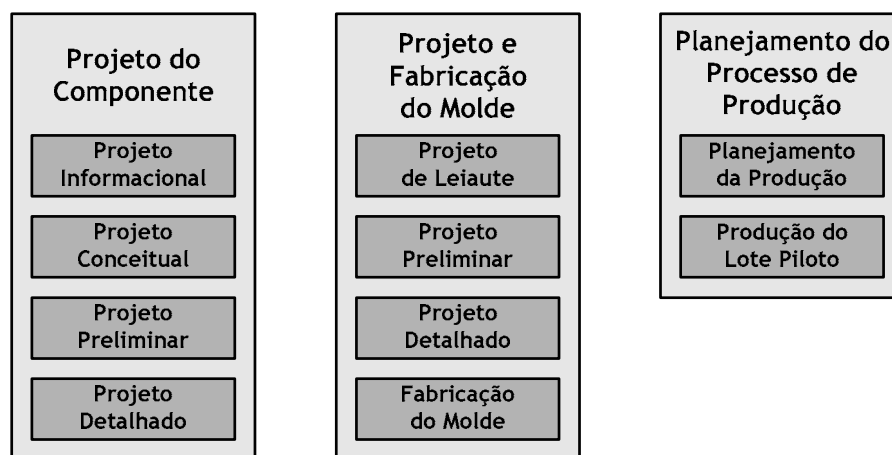


Figura 2-2: Fases do desenvolvimento de componentes moldados por injeção e suas subdivisões (adaptada de Daré [2])

Na elaboração desse modelo foi estabelecida uma parceria entre dois laboratórios vinculados ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina: o NeDIP³ e o Cimject⁴. Estes laboratórios integraram o PAT⁵ onde participaram do processo de re-projeto de quatro componentes plásticos formando um sistema técnico. Para tanto, formaram uma equipe de projeto

³ Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos - (www.nedip.ufsc.br)

⁴ Lab. de Projeto de Fabricação de Componentes de Plástico Injetados - (www.cimject.ufsc.br)

⁵ Núcleo de Desenvolvimento de Processos e Produtos de Alta Tecnologia

composta de especialistas ligados às etapas do ciclo de desenvolvimento, servindo de auxílio para a elaboração e validação do modelo proposto.

Convém destacar a grande contribuição deste modelo ao setor de componentes moldados por injeção, uma vez que este tem sido caracterizado pelo empirismo e insipiência dos métodos de trabalho, sobretudo no desenvolvimento de produto [2]. Além disso, servirá como base para reformulação de modelos específicos para as empresas deste ramo.

No entanto, faz-se necessário o detalhamento maior de algumas tarefas, pois o autor confere algumas indicações “do que deve ser feito” em cada uma delas, mas de maneira superficial [14]. Neste sentido, alguns trabalhos⁶ foram desenvolvidos procurando complementar algumas carências do modelo de referência.

O presente trabalho pretende detalhar as tarefas de **Confecção do Protótipo do Componente e Testes Funcionais**, presentes na fase de projeto preliminar do componente, ilustrada na figura 2-3 e figura 2-4.

As informações que o modelo apresenta se restringem a citar que em alguns casos, faz-se necessário construir um protótipo para ser submetido a testes funcionais, para avaliar as soluções adotadas quanto ao cumprimento das necessidades, requisitos e restrições de projeto e que as técnicas de prototipagem rápida são as mais adequadas para se reduzir o tempo gasto com a fabricação. Um maior detalhamento destas atividades proporcionará a escolha correta do tipo de protótipo a ser confeccionado e respectivo processo de fabricação, considerando sempre a sua futura aplicação em testes, bem como, a posterior avaliação, subsídios necessários para os projetistas de componentes moldados por injeção.

⁶ Neste sentido se enquadram os trabalhos [14] e [15].

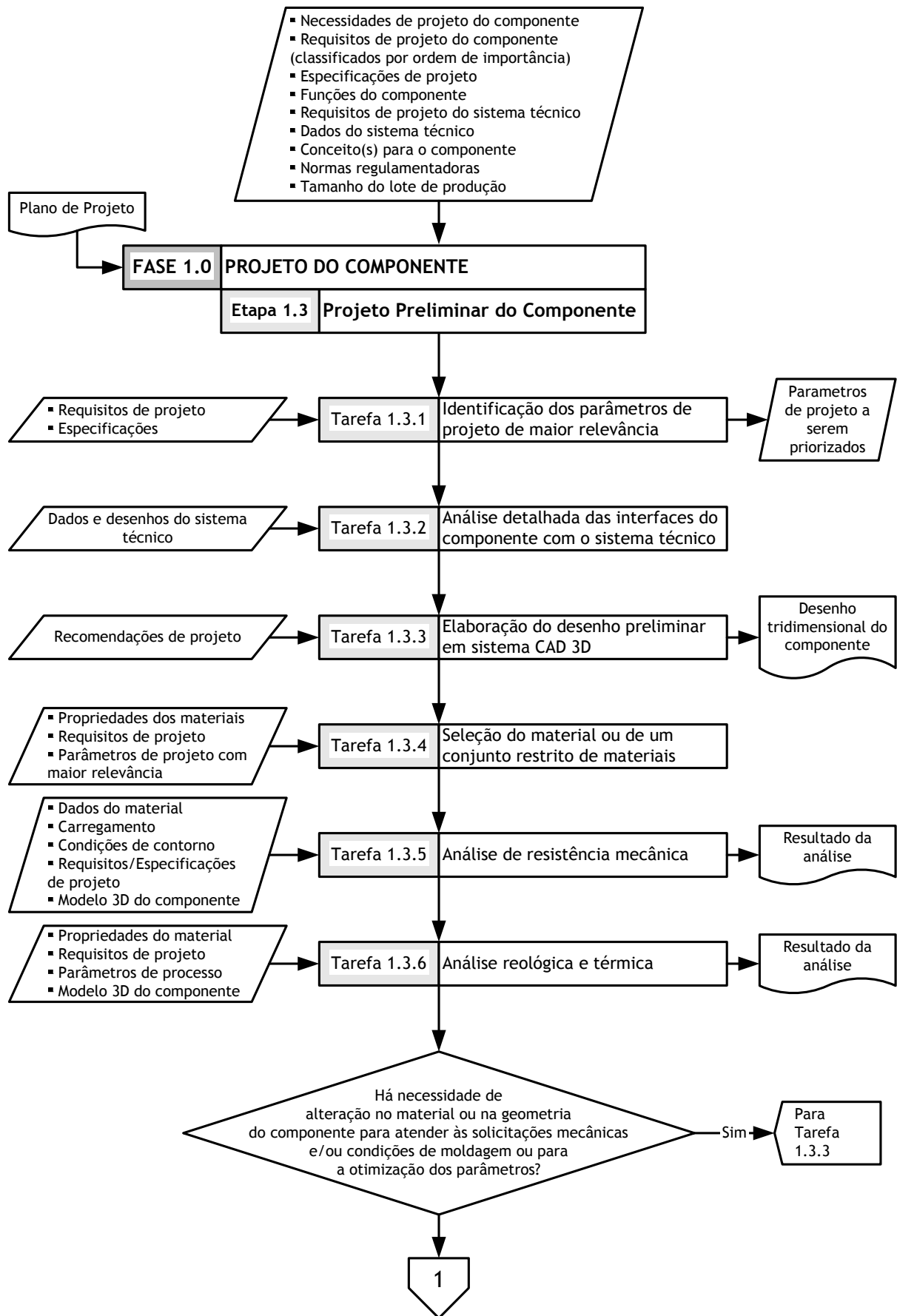


Figura 2-3: Etapa de projeto preliminar de componentes de plástico injetados [2]

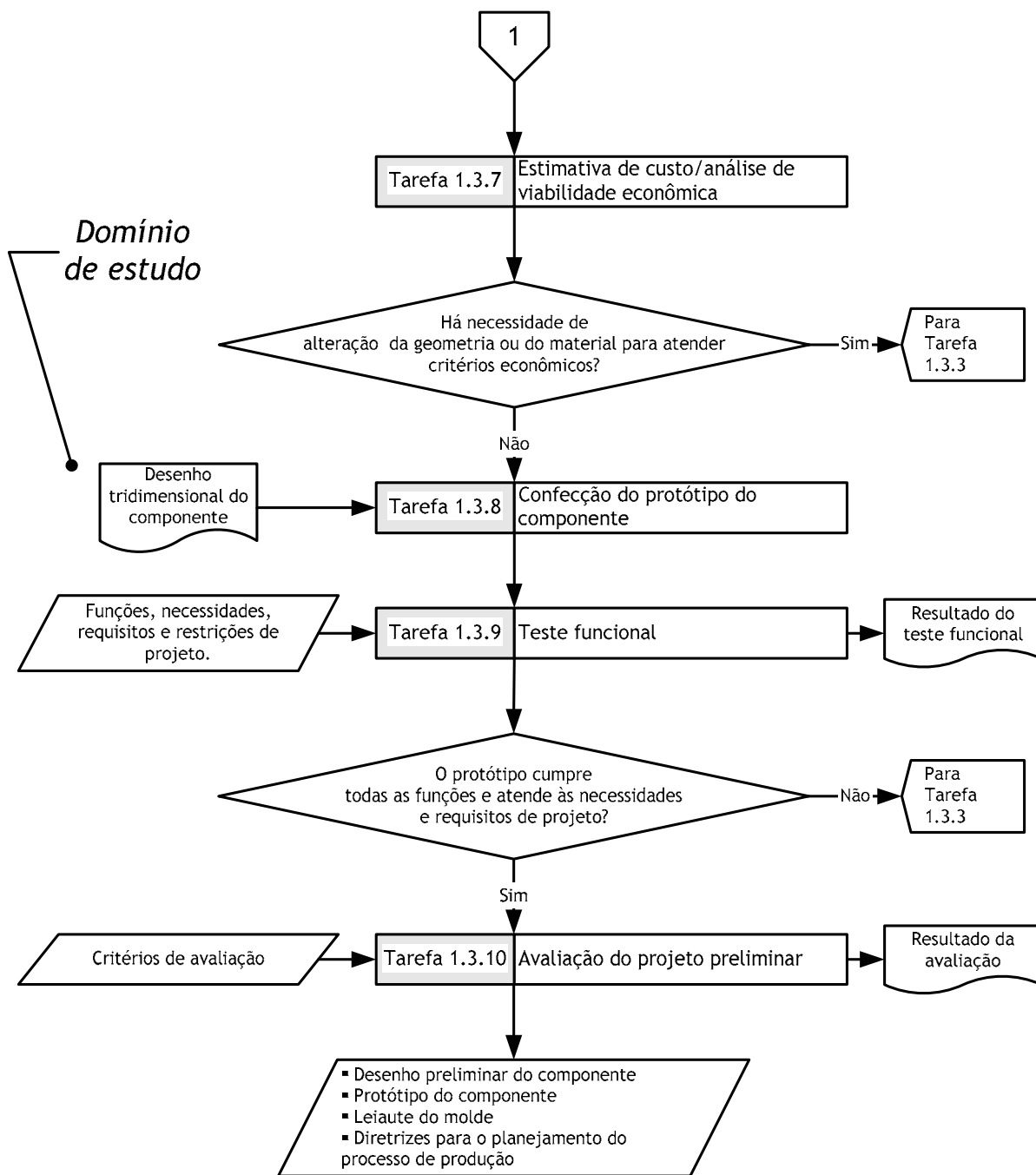


Figura 2-4: Etapa de projeto preliminar de componentes de plástico injetados (continuação) [2]

2.2 Protótipo: Definição e classificação

Parece não haver uma definição consensual em relação ao termo protótipo que é cercado de variações. Isto pode ser observado na descrição encontrada no Novo Aurélio: Dicionário da Língua Portuguesa [16]:

Protótipo. [Do gr. *protótypos*, pelo lat. tard. *Prototypu*.] S. m. 1. Primeiro tipo ou exemplar; original, modelo: [...] 2. Inform. Versão parcial e preliminar de um novo sistema de computador ou de um novo programa, destinada à teste e aperfeiçoamento. 3. Tec. Produto fabricado individualmente ou produzido de modo artesanal, e segundo as especificações de um projeto para fabricação em série, com o propósito de servir de teste antes da fabricação em escala industrial, ou da comercialização. [...]

Visando facilitar a compreensão deste trabalho, apesar de ser abrangente, será utilizada a definição sugerida por Ulrich e Eppinger [11], pois dentre a bibliografia consultada foi considerada a que apresentou melhor significado para a fase de projeto preliminar de produto. Os autores definem protótipo como sendo “uma aproximação do produto por meio de uma ou mais dimensões de interesse”, ou seja, qualquer entidade que manifeste algum aspecto do produto e que seja do interesse da equipe de projeto poderá ser aceita como um protótipo.

Esta definição causa certa polêmica, pois estende o termo protótipo para um campo onde, normalmente, utiliza-se o termo modelo. Diversos autores propuseram classificações alternativas que tentam estabelecer os limites de cada um destes termos [1] [4] [17] [18] [19], porém, neste trabalho não haverá distinção entre os mesmos.

Dependendo da fase de desenvolvimento e da forma com que se manifesta um aspecto do produto, o protótipo poderá receber terminologias específicas. Estas terminologias podem ser classificadas conforme duas dimensões [11] [18]. A primeira dimensão diz respeito à constituição material. Protótipos físicos representam o produto de maneira tangível, como por exemplo: maquetes, modelos em espuma, protótipos de pré-produção. Em oposição aos físicos, estão os protótipos analíticos que representam o produto de modo não tangível. Neste grupo se enquadram os modelos matemáticos, os modelos 3D CAD e as simulações computacionais. A segunda dimensão classifica os protótipos conforme o grau de

aproximação do produto. Os protótipos focados, como o próprio nome sugere, representam somente alguns atributos do produto, ou seja, os protótipos podem se parecer com o produto ou funcionar, mas nunca parecer e funcionar como o produto final. Esta é uma qualidade dos protótipos integrais⁷ que representam se não todos, a maioria dos atributos do produto. O figura 2-5 apresenta como algumas representações do produto podem ser dispostas considerando simultaneamente as duas dimensões de classificação.

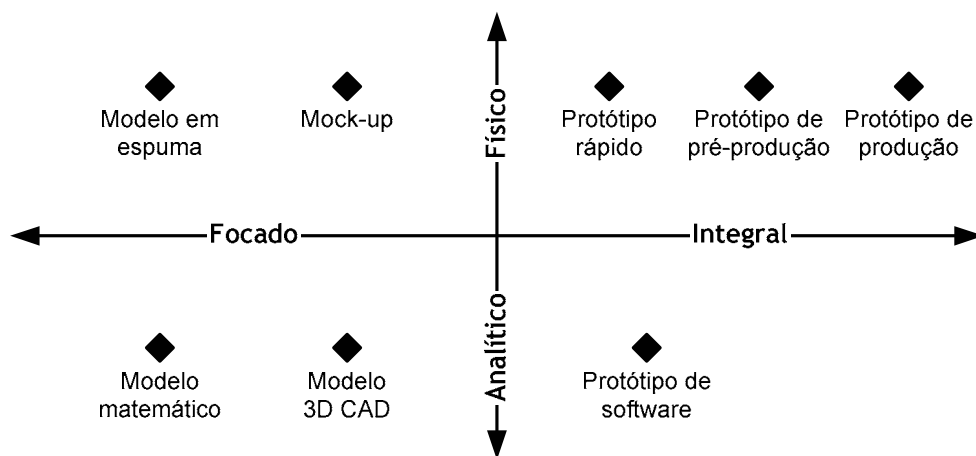


Figura 2-5: Disposição de alguns tipos de protótipos considerando simultaneamente as duas dimensões de classificação (adaptada de Ulrich e Eppinger [11])

2.3 Importância do uso de protótipos no desenvolvimento de componentes moldados por injeção

A utilização ou não de protótipos dependerá da categoria na qual o produto em desenvolvimento está inserido, conforme ilustrado na figura 2-6. No desenvolvimento de produtos “únicos” - *one-off* - ou de pequenas séries o uso de protótipos geralmente não se mostra uma opção economicamente viável. Visando minimizar o risco de insucesso estes desenvolvimentos são realizados de forma cautelosa e com maior duração. Algumas partes do sistema poderão ser avaliadas

⁷ Adaptação do termo da língua inglesa “*comprehensive*”.

com a utilização de protótipos focados. No outro extremo, o de produção em massa, as questões técnicas e econômicas devem estar resolvidas antes do início da produção. Neste caso, até que a qualidade desejada seja alcançada realizam-se etapas de melhoria com auxílio de protótipos focados e integrais [20].

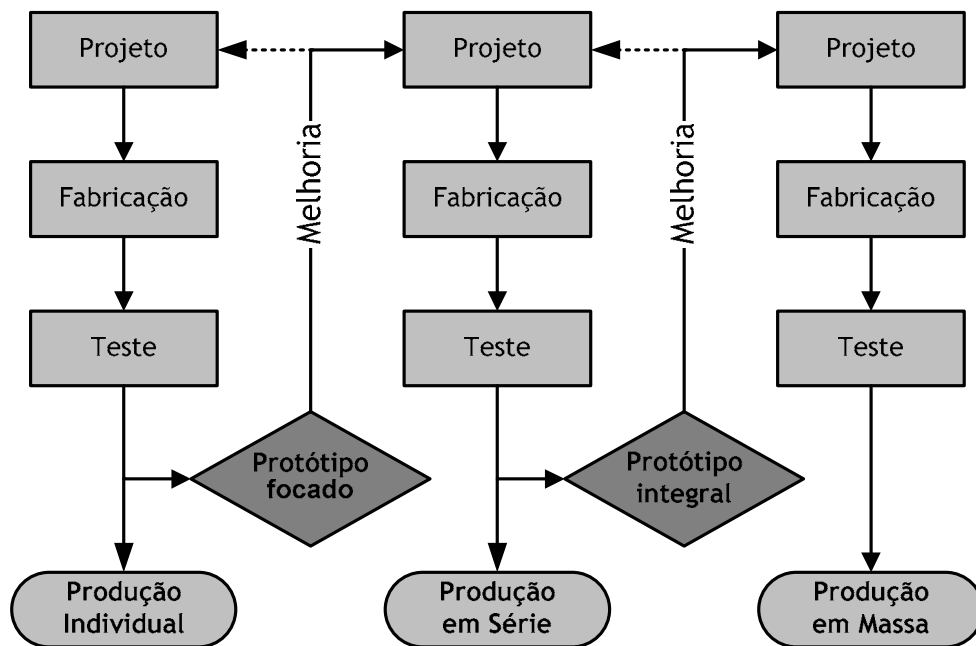


Figura 2-6: Tipos de protótipos usualmente empregados para diferentes categorias de produção (adaptado de Pahl e Beitz [20])

É de conhecimento que o processo de moldagem por injeção de componentes de plástico não é o meio mais indicado para a produção de um único produto ou de pequenas séries. Como abordado anteriormente, o alto custo de fabricação do ferramental e do maquinário empregado limita a aplicação deste processo de fabricação que se torna viável somente a partir da produção de grandes séries. Neste caso, a utilização de protótipos é necessária para o desenvolvimento destes produtos e eventual planejamento da produção. São incomuns os casos onde não é produzido algum protótipo físico, possivelmente, por ser a forma mais eficaz para transmitir uma idéia [10] e por se assemelhar mais daquilo que provavelmente será o produto industrializado [18]. Projetistas freqüentemente utilizam protótipos físicos para testar suas idéias, pois a previsão

mental do comportamento de um sistema complexo é geralmente difícil e tendente ao erro [21].

A avaliação do desempenho de protótipos físicos, como o exemplificado na figura 2-7, pode ser realizada mediante o uso da capacidade sensorial do usuário (visão, audição, paladar, olfato e tato). Desta forma, os protótipos físicos tornam-se valiosas ferramentas de comunicação, haja vista a associação de objetos físicos à maior facilidade na transmissão e recepção de informações [22]. O protótipo físico de um componente geometricamente complexo facilitará o projetista a conceber mais rapidamente o molde a partir da visualização tridimensional do produto [1].



Figura 2-7: Protótipo físico produzido por estereolitografia (cortesia DSM SOMOS)

Embora apresentem as qualidades supracitadas, os protótipos físicos apresentam desvantagens, relacionadas ao elevado tempo de fabricação e à baixa capacidade de adaptação às modificações de projeto, principalmente em desenvolvimentos iterativos [22].

A partir da década de 70 observou-se um constante aumento da utilização de protótipos analíticos [23] que ao contrário dos físicos, representam somente algumas características do produto, o desempenho do produto, neste caso, pode

ser avaliado somente em parte. Com o advento e massificação dos sistemas CAE/CAD/CAM, observou-se nos últimos tempos uma tendência à utilização maior de protótipos virtuais ou digitais no desenvolvimento de produtos [22]. De posse dos protótipos virtuais, dos componentes do sistema técnico, pode se realizar, por exemplo, a verificação da forma, estética, interferências em montagens, simulações de funcionamento, análise de elementos finitos (ilustrada na figura 2-8) e aplicações de realidade virtual. Isto, sem a confecção de um único protótipo físico. Ao contrário dos protótipos físicos, eventuais melhorias que acarretem em mudanças no projeto inicial podem ser facilmente realizadas, e em alguns casos instantaneamente⁸. Além disso, protótipos virtuais podem ser facilmente utilizados como ferramentas de comunicação, envolvendo simultaneamente os integrantes de toda a cadeia de desenvolvimento (fornecedores, marketing, design, engenharia, produção, vendas, etc) no ambiente de engenharia simultânea.

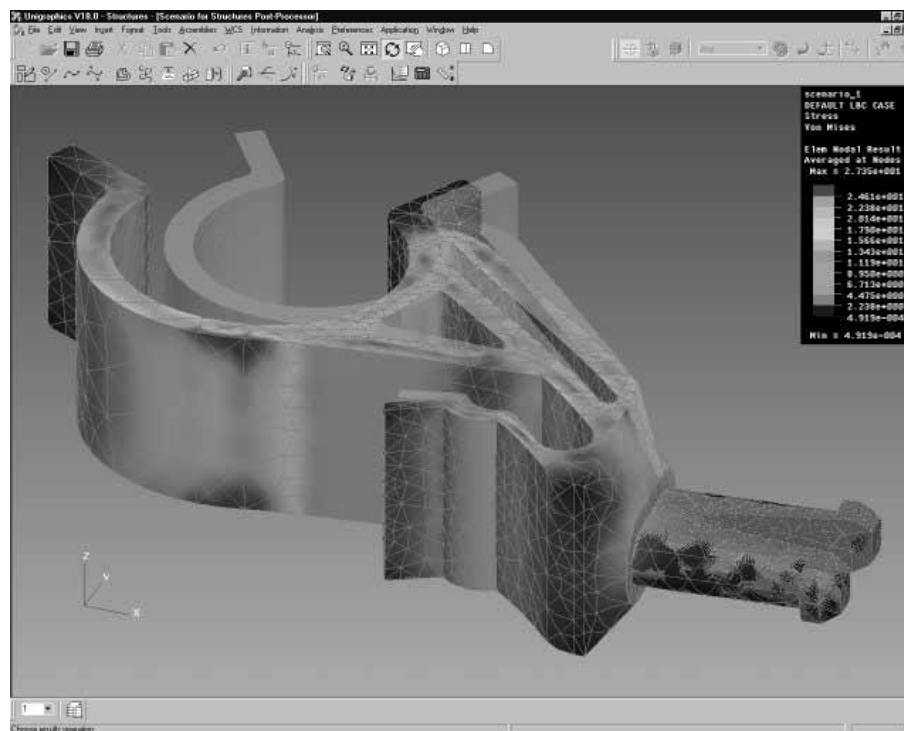


Figura 2-8: Análise de tensões em um protótipo virtual

⁸ Sistemas CAD/CAM integrados, modificações ao nível de componente podem ser propagadas para montagens, desenhos e programas nc.

Os protótipos virtuais apresentam a desvantagem de não ser uma representação tridimensional autêntica. Desta maneira, a interpretação por parte do usuário da visualização do protótipo pode ser equivocada. Muitas vezes a imagem reproduzida resulta em dupla interpretação, principalmente, relacionada à dimensão profundidade. Isto pode ser agravado com o aumento da quantidade de componentes em montagens de sistemas técnicos. Além disso, o senso de dimensão é perdido com a imagem reproduzida, pois a escala representada dificilmente é a natural. O investimento em equipamentos, softwares e pessoal especializado é relativamente alto. Por fim, o maior prejuízo ao utilizar protótipos virtuais está na falta da percepção tátil, um dos sentidos de maior importância na avaliação de um produto de uso.

Existe uma tendência de substituição de protótipos físicos por virtuais [22], porém o aumento da utilização de protótipos analíticos não está relacionado a diminuição do interesse por protótipos físicos, mas sim pela acessibilidade de computadores e sistemas CAE/CAD/CAM. Conforme mostra a figura 2-9, os protótipos rápidos, uma classe dos protótipos físicos, ao contrário tem aumentado anualmente a uma taxa média de 25%.

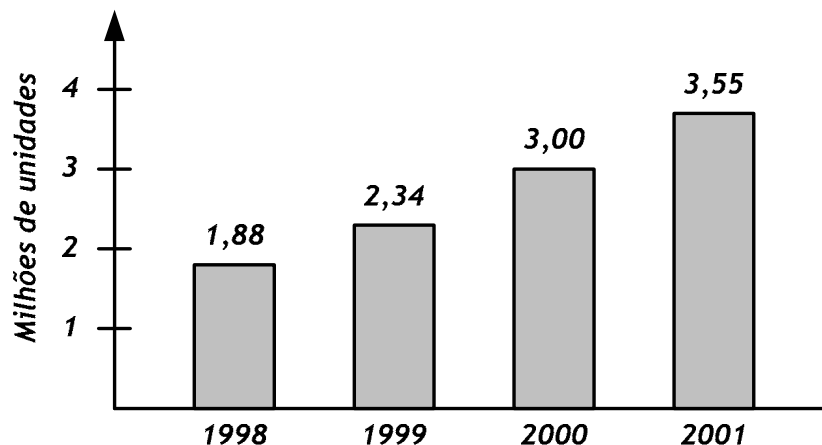


Figura 2-9: Estimativa mundial anual da quantidade de protótipos rápidos produzidos [24]

Os protótipos físicos e virtuais não são excludentes, em muitos casos, eles são utilizados em seqüência como forma de aumentar a eficiência no desenvolvimento de produtos. Realizar uma etapa de revisão de projeto com apoio de um protótipo físico pode representar uma garantia de maior êxito no projeto. Problemas de modelagem em softwares CAD 3D são freqüentes e, quanto antes descobertos, menores serão os prejuízos.

Os protótipos focados são comuns às fases iniciais do desenvolvimento quando os atributos do produto ainda estão em fase de definição. Portanto, muitas vezes, são utilizados dois ou mais protótipos deste tipo para avaliar o produto como um todo [11]. Ao utilizar protótipos que se parecem com o produto e protótipos que funcionam como o produto, a equipe de projeto pode analisar o produto de forma rápida e barata. Por outro lado, os protótipos integrais possibilitam analisar todos ou quase todos os atributos do produto, além da influência de um atributo sobre outro. Geralmente, estes protótipos são mais caros e demandam maior tempo de fabricação. Por isso são utilizados em etapas mais avançadas do desenvolvimento depois do produto atingir “maturidade” suficiente. O resultado de um questionário submetido a 75 projetistas de 40 empresas de diferentes segmentos industriais, localizadas na Alemanha, República Tcheca, Liechtenstein e Bélgica, sustenta esta idéia [25]. Pode-se observar no gráfico da figura 2-10 que boa parte dos projetistas assinalou que os protótipos focados são mais comuns à fase de projeto conceitual, enquanto os protótipos integrais são mais apropriados a fase de projeto preliminar. Outro ponto de destaque é que alguns projetistas responderam que utilizam protótipos focados e integrais já na fase de projeto informacional.

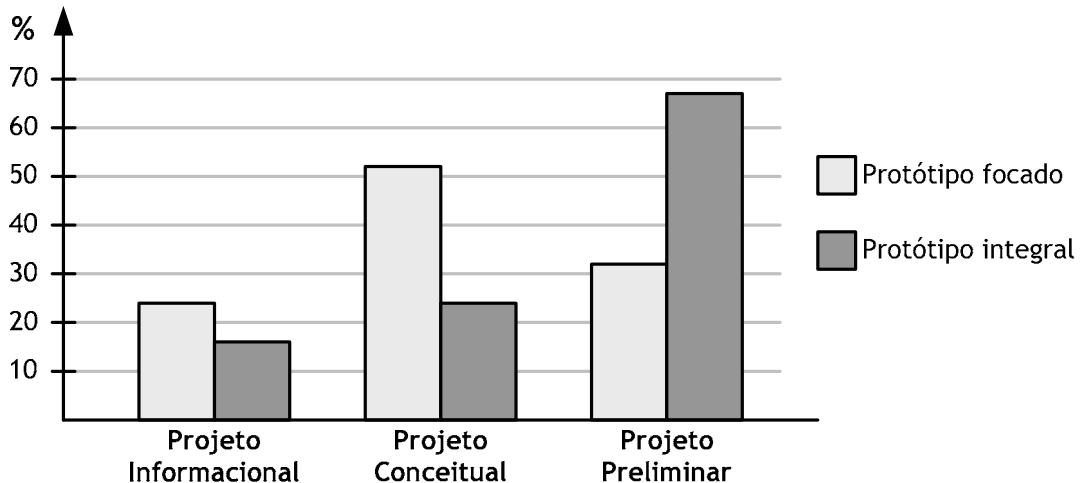


Figura 2-10: Resultado da pesquisa mostrando a relação entre o tipo de protótipo e a fase do processo de projeto. Adaptado de Pache, et alii [25]

2.4 Prototipagem no ambiente de engenharia simultânea

Uma das críticas mais corriqueiras das metodologias de projeto é a forma seqüencial como as atividades são realizadas [12]. Esta forma acarreta em um elevado tempo de desenvolvimento, já que, cada nova atividade só é iniciada a partir do término da anterior. Outra crítica que tem sido apontada na literatura refere-se às barreiras que são formadas entre os diversos setores envolvidos no desenvolvimento do produto (marketing, vendas, design, engenharia, etc.), principalmente relacionados à inadequada comunicação entre os profissionais envolvidos, como mostra a ilustração da figura 2-11.

Ainda, o desenvolvimento é realizado, muitas vezes, sem considerar as fases posteriores do ciclo de vida do produto, potencializando que re-trabalhos aconteçam, o que causará custos adicionais de desenvolvimento e prorrogação do lançamento do produto [26]. A figura 2-12 ilustra graficamente o custo de modificações durante a evolução do ciclo de vida do produto. Tomando como exemplo a inclusão de uma simples nervura em um componente, se esta for adicionada durante a fase de projeto preliminar após a realização de análises

estruturais em protótipos virtuais, o custo será mínimo se comparado com a inclusão do mesmo item depois do lançamento do produto, durante a fase de uso do produto. Neste caso, o custo de alteração do ferramental e sucateamento do estoque existente é muito elevado, mas é pouco representativo se comparado ao custo da não qualidade (*recall*).

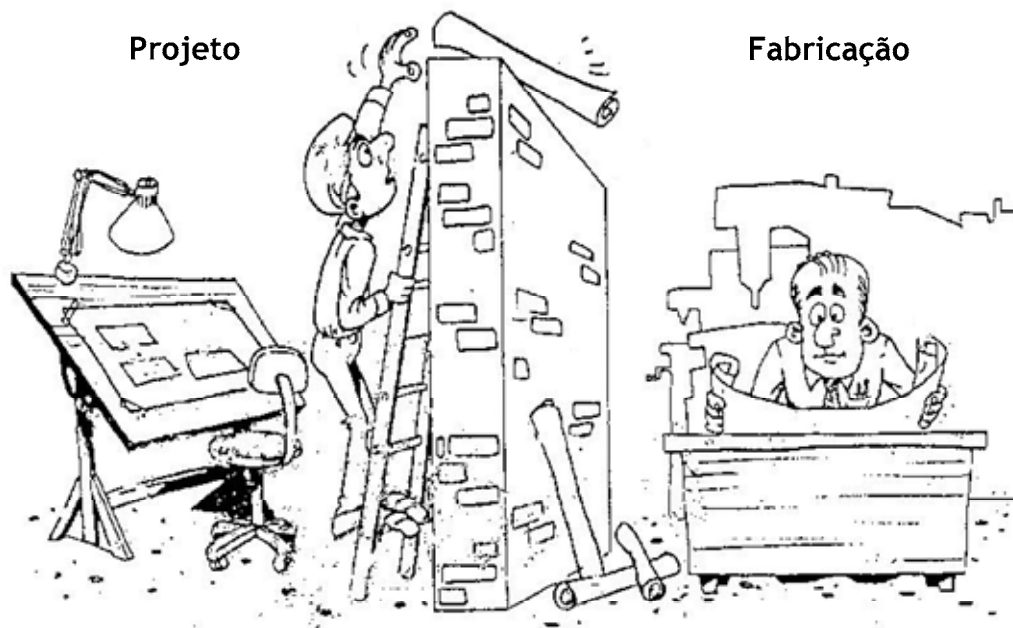


Figura 2-11: Representação simbólica da barreira que é formada entre setores de projeto e fabricação na forma seqüencial de desenvolvimento de produtos [27]

Por outro lado, tem sido destacado que as fases iniciais do processo de projeto, embora contabilizem 5% do custo de desenvolvimento, influenciam 70% do total do custo de um produto em seu ciclo de vida [3] [28]. Deste ponto de vista é muito mais vantajoso que a identificação dos problemas ocorra nas fases iniciais do desenvolvimento, como na fase de concepção do produto, por exemplo. Assim, além do aspecto de custo, os produtos serão lançados no mercado com incremento de qualidade e muito mais cedo.

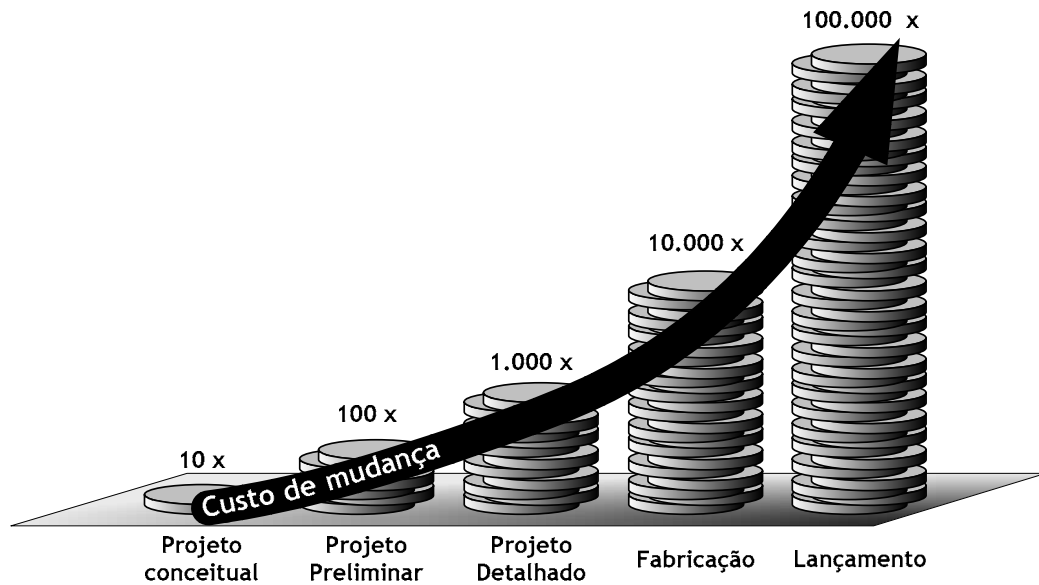


Figura 2-12: Evolução dos custos de modificação ao longo do ciclo de vida dos produtos. (adaptada de Back e Forcellini [3])

Para que a equipe de desenvolvimento alcance harmoniosamente os objetivos de menor tempo de desenvolvimento, menor custo e melhor qualidade, deve considerar os princípios da engenharia simultânea [2]. Esta consiste numa forma organizada de desenvolvimento de produto onde a equipe multidisciplinar deve estar integrada desde o início até o término do projeto, além de fazer uso de metodologias de projeto e práticas de gerenciamento. Tendo em vista o maior envolvimento e comprometimento do pessoal, planejamento adequado do projeto e emprego de melhores práticas, geralmente o tempo de desenvolvimento diminui sem trazer decréscimo de qualidade ao produto. A figura 2-13 mostra conceitualmente a redução no tempo de desenvolvimento do projeto empregando-se princípios de engenharia simultânea.

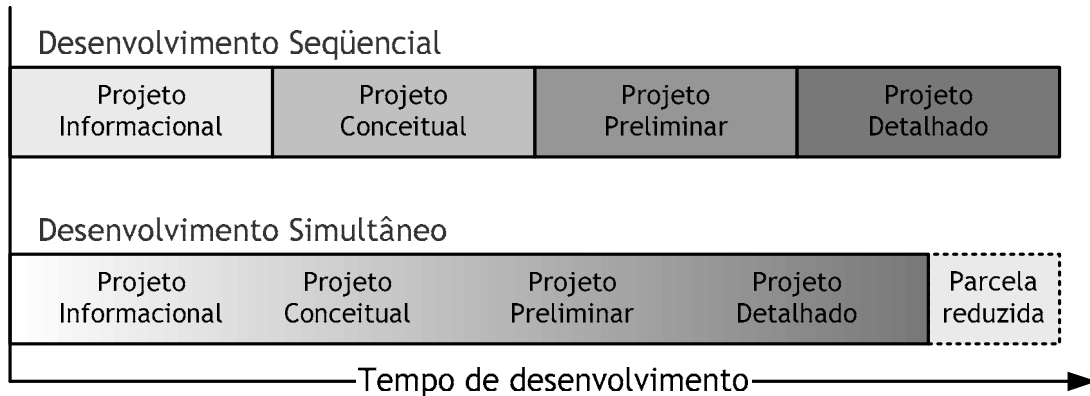


Figura 2-13: Comparação esquemática entre o desenvolvimento sequencial e simultâneo do processo de projeto

Neste cenário, a prototipagem rápida tem uma participação importante, ora como uma forma eficaz de comunicação e auxílio ao processo decisório, ora na elaboração de protótipos com características necessárias para antecipação de alguns testes de soluções propostas para o produto, fornecendo um indicativo suficiente para projetar o desempenho do produto já nas fases iniciais de desenvolvimento. São muitos os relatos onde a adoção de técnicas de prototipagem rápida proporcionam reduções em torno de 50% no tempo de lançamento de produtos [29]. Entretanto, o que a maioria dos autores não destaca é que o uso destas técnicas de forma não integrada resulta em modestas reduções se comparada a utilização combinada durante todo o processo de desenvolvimento do produto [28]. Os ganhos podem ser ainda maiores se a área de prototipagem, seja ela interna ou externa à empresa, atuar como parte integrante da equipe multidisciplinar de desenvolvimento, participando efetivamente das decisões.

2.5 Tipos de testes com protótipos no processo de projeto

A tendência mundial em diminuir o tempo de desenvolvimento e a vida útil de produtos tem forçado empresas a se tornarem cada vez mais ágeis. Esta propensão afeta o processo de projeto. Para garantir os prazos, muitas vezes as

empresas optam pelo lançamento mesmo que o produto não tenha atingido o patamar de custo projetado. Depois do lançamento, procura-se otimizar o produto, tornando-o mais competitivo, por exemplo, com a substituição de materiais e melhoria no projeto. Como visto no item anterior, neste estágio, alterações são muito custosas, pois toda a estrutura produtiva já está disposta.

No caso do desenvolvimento seqüencial, uma nova fase de projeto é iniciada com o término da fase anterior, diferente do desenvolvimento simultâneo onde uma nova fase pode ser iniciada quando a equipe de projeto dispõe de informações suficientes e confiáveis para seguir adiante [11]. Uma das formas utilizadas para prover estas informações é a realização de testes com auxílio de protótipos. Além de reduzir as incertezas para as fases posteriores, empresas na vanguarda procuram formas de antecipar a realização de testes que só poderiam ser realizados após a fabricação do ferramental. A figura 2-14 ilustra os diferentes tipos de testes realizados ao longo do processo de projeto de engenharia.

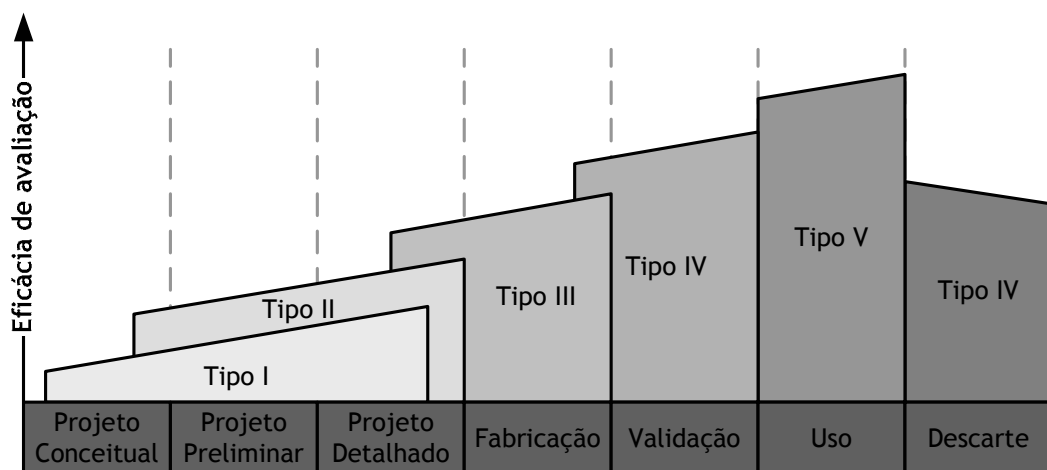


Figura 2-14: Representação esquemática dos diferentes tipos de testes realizados no desenvolvimento de produtos (adaptada de Blanchard e Fabryky [30] e Back e Forcellini [3])

Como pode ser observado, testes estão presentes durante o decorrer de todo o ciclo de vida dos produtos e podem ser divididos em seis tipos principais [30] [3]:

- **Tipo I**

São realizados com auxílio de protótipos analíticos durante a fase de projeto conceitual até o detalhamento do projeto. Verificação de montagem e interferência, simulações do comportamento térmico, reológico e integridade estrutural são exemplos de testes possíveis. São considerados os testes mais versáteis e de menor custo comparados aos demais [3].

- **Tipo II**

São realizados durante as fases de projeto conceitual, preliminar e detalhado. Neste caso, são utilizados protótipos físicos para facilitar o processo de escolha da concepção mais adequada e na avaliação do projeto quanto aos requisitos de forma, estética e ergonomia. Ainda estão incluídas, nesta categoria, as primeiras avaliações quanto ao funcionamento do sistema técnico ou de um componente isolado do sistema. Entretanto, nesta fase do desenvolvimento são utilizados protótipos focados, pois os componentes finais ainda não foram fabricados. As mudanças provenientes deste tipo de teste são facilmente incorporadas ao projeto com incremento insignificante de custo.

- **Tipo III**

Os testes Tipo III, geralmente, são iniciados durante o projeto detalhado e se estendem até a fase de construção ou fabricação. Para este tipo de teste faz-se necessário à utilização de protótipos que reproduzam as características do sistema ou componente com maior fidelidade, entretanto, não a ponto de representá-lo completamente. Neste caso são utilizados protótipos integrais. Fazem parte deste tipo: testes de desempenho, qualificação ambiental, teste estrutural,

confiabilidade, compatibilidade com equipamentos de apoio, teste e avaliação com usuários e verificação dos procedimentos técnicos.

- **Tipo IV**

Abrangem testes nos primeiros exemplares de produção (também conhecidos como cabeça de série) envolvendo as etapas de construção e validação. Podem ser realizados em campo (in loco), neste caso, avaliando as condições reais de trabalho, ou seja, trata-se de uma avaliação realística do sistema / componente.

- **Tipo V**

Testes nesta etapa são realizados como forma de monitoramento de qualidade. Informações provenientes dos usuários são filtradas e servem de base para a composição do IRC (Índice de Reclamações dos Consumidores). Com base nestes índices, pode-se verificar se houve ou não o atendimento das necessidades dos consumidores. Estas informações podem, então, ser utilizadas para melhorias no produto atual e como dados de referência para projetos similares.

- **Tipo VI**

Testes desta natureza são comuns à fase de descarte. Neste momento o produto já percorreu o ciclo de vida por completo e traz consigo informações valiosas. O sistema como um todo, bem como, um componente separado, pode ser examinado, identificando se o comportamento está dentro dos níveis aceitáveis. A partir desta análise, estes dados podem ser utilizados em projetos similares buscando otimização e tornando o produto mais competitivo.

Esta distribuição tem caráter abrangente porque não é possível definir uma posição exata para a realização de testes em produtos [20]. A realização destes

dependerá em muito da complexidade e do tipo de projeto em questão, bem como, da experiência adquirida pela empresa.

2.5.1 Testes com protótipos físicos de componentes moldados por injeção na fase de projeto preliminar

A fase de projeto preliminar é caracterizada por transformar aquilo que é abstrato em concreto, ou seja, durante esta fase, a equipe de projeto, a partir da concepção escolhida na fase de projeto conceitual, estruturará o componente ou produto [20]. Durante este processo são tomadas decisões que influenciarão as quatro variáveis do desenvolvimento do produto, tempo de desenvolvimento, custo de desenvolvimento, custo do produto e qualidade do produto [8]. A medida em que mais decisões são tomadas, surgirão novas dúvidas, muitas vezes mais específicas, como as citadas a seguir para o caso de componentes moldados por injeção.

- Será que a espessura do componente está de acordo?
- Esta é a forma geométrica mais adequada?
- Será que o projeto do engate rápido (*snap-fit*) está adequado?
- O material escolhido é o mais apropriado?
- Até que ponto, defeitos como o rechupe, influenciarão negativamente na estética do componente?
- O componente está dentro da faixa de custo estabelecida?

Diante desta situação, em um certo momento a equipe de projeto necessitará verificar a eficiência das soluções adotadas, isto é, se as decisões adotadas se aproximam ou se afastam do que foi proposto nas fases anteriores. Um dos meios para medir a eficiência para suprir os requisitos do projeto é através de

testes com protótipos físicos [31]. A eficiência do produto está intimamente ligada à forma com que o mesmo desempenha suas funções que são as características com as quais os usuários interagirão durante a fase de uso e que possibilitarão a satisfação de suas necessidades [32] [33].

Cabe ressaltar que o estabelecimento de funções nem sempre é uma tarefa simples, principalmente no caso de desenvolvimento de novos produtos. Alguns trabalhos [2] [12] [15] demonstraram a dificuldade na determinação de funções de componentes moldados por injeção. Os autores relacionaram esta dificuldade a metodologias que objetivam dar um tratamento muito refinado à síntese funcional ao nível de princípios de solução. Apesar de ser considerado como um método que limita a criatividade e induz utilização de soluções pré-concebidas, o projeto com base em *features* é uma forma mais adequada para ser aplicada ao projeto de componentes [2]. Entretanto, estes métodos estão orientados ao estabelecimento de funções de ordem técnica. Funções de ordem ergonômica e estética são de certa forma desconsideradas no início, conforme o preceito de que “a forma segue a função” [34]. Este procedimento vem sendo bastante combatido, pois apesar das funções técnicas terem relações mais estreitas com os usuários [32], as funções ergonômicas e estéticas não devem ser desprezadas, sobretudo, pelo valor que vêm sendo conferido pelos usuários nos últimos tempos [5]. A própria constituição de equipes de projeto multidisciplinares tem contribuído para que forma e função sejam desenvolvidas simultaneamente na concepção do produto.

A avaliação estética com auxílio de protótipos físicos permite antecipadamente analisar a combinação de forma, material, textura e cor. O ser humano apresenta uma característica intrínseca, o popularmente conhecido “ver com as mãos”. A avaliação estética será mais proveitosa dispendo de um objeto

que pode ser tocado, manipulado e observado sob diferentes pontos de vista [35]. Muitas destas características já são possíveis de serem avaliadas com auxílio computacional, porém não ao alcance da maioria dos usuários.

Os componentes moldados por injeção estão cada vez mais sendo incorporados aos produtos. Desta forma, aspectos referentes à ergonomia devem ser considerados, pois, muitas vezes, são utilizados externamente, interagindo diretamente com os usuários. A avaliação ergonômica inclui a verificação do manuseio, da adaptação antropométrica, do fornecimento claro de informações, das compatibilidades de movimentos, do conforto e da segurança na operação [36]. Mesmo com a evolução de aparatos de realidade virtual estes quesitos não são adequadamente avaliados de maneira satisfatória.

A avaliação técnica se destina a verificar, principalmente, características físicas, mecânicas, elétricas e térmicas nos produtos quanto ao cumprimento das especificações de projeto. A avaliação técnica compreende a verificação dimensional, através do estudo de suas interfaces com os demais componentes como a tentativa de montagem, em relação às tolerâncias, dimensões e geometria. O funcionamento do componente também poderá ser avaliado juntamente com demais partes do sistema técnico que em operação possibilitará antecipadamente avaliar a eficiência, rendimento, ruídos e vibrações, aquecimento, facilidade de limpeza e manutenção do mesmo.

Inicialmente, estas avaliações devem ser conduzidas de forma independente com o uso de protótipos focados. O uso de um protótipo integral poderá ser uma decisão precipitada. Depois do projeto preliminar alcançar um certo grau de maturidade, estas funções poderão ser analisadas simultaneamente com um protótipo desta natureza.

Os melhores avaliadores de produtos são os próprios usuários, assim empresas líderes procuram utilizá-los desde o início do desenvolvimento [9]. As informações provenientes dos usuários apresentam fundamentação e poderão apoiar importantes mudanças nas diretrizes do projeto. Para a equipe de projeto, um parecer antecipado favorável é um bom sinal de que o projeto está no rumo certo. Caso contrário, pode haver tempo hábil para mudanças no produto.

Estas idéias foram demonstradas por Lopez e Wright [37] no desenvolvimento de um gabinete de plástico para um *video game* portátil. Os autores destacam que no passado os gabinetes destes produtos não passavam de caixas com objetivos inteiramente funcionais, sem qualquer preocupação com questões estéticas e ergonômicas. Porém, a grande concorrência neste setor tem levado as empresas a investirem cada vez mais em produtos ergonômicos e com design sofisticado. Os autores envolveram os primeiros usuários desde o início do desenvolvimento que inicialmente participaram do levantamento das necessidades do produto, através de questionários estruturados e de clínicas com produtos existentes. Este envolvimento inicial proporcionou à equipe de desenvolvimento um maior conhecimento das reais necessidades do consumidor potencial. Com base nas informações adquiridas foram elaboradas três concepções de produto. Cada qual apresentava forma bastante inusitada, diferente disposição dos controles e característica. A equipe de projeto fabricou três protótipos focados de cada um dos conceitos e os encaminhou para apreciação pelos usuários que relacionaram os pontos fortes e fracos de cada conceito. A equipe de projeto centralizou-se na geometria mais adequada e procurou introduzir as características desejáveis dos três conceitos apontados. Novamente, os primeiros usuários participaram da validação do conceito final que ainda foi trabalhado pela equipe de projeto.

Somente depois da validação do conceito final, a equipe fabricou o primeiro - e único - protótipo integral para uma avaliação final do produto. Através deste estudo de caso os autores provaram que a utilização de protótipos físicos para testes de produtos, sobretudo, com o envolvimento dos primeiros usuários no desenvolvimento do produto supracitado contribuiu para a melhoria de produtos.

A etapa de projeto preliminar, das etapas do processo de projeto, é caracterizada por grande iteratividade. Segundo Bernsen [38], os produtos concebidos pelo homem são fruto de um processo lento e contínuo de tentativa e erro. Como exemplos destacam-se o martelo do carpinteiro e o machado do lenhador. Ambos constituem soluções válidas para um problema de projeto. São ferramentas equilibradas do ponto de vista funcional, visual e, de certa forma, ergonômico. Desde a criação, estas ferramentas foram adaptadas através de um processo de desenvolvimento gradual, com melhoramentos sendo acrescentados ao longo de gerações, até que essas ferramentas adquirissem as suas formas finais. A natureza realiza um processo semelhante que já dura milhões de anos, onde explorou um amplo cenário de possíveis soluções e de onde selecionou aquelas que melhor serviam ao seu propósito.

A equipe de projeto soluciona um problema semelhante durante a etapa de projeto preliminar - “encontrar a solução ótima entre a infinidade de soluções possíveis” - porém dentro de um espaço de tempo limitado e cada vez menor, e isto num ambiente em que os objetivos e os meios estão expostos a mudanças rápidas e contínuas [38].

CAPÍTULO 3 - PROCESSOS PARA A FABRICAÇÃO RÁPIDA DE PROTÓTIPOS

3.1 Generalidades

Existe uma grande variedade de processos de prototipagem no mercado, alguns dos quais são capazes de até mesmo produzir protótipos de plástico. A seleção do processo mais adequado é, muitas vezes, uma solução de compromisso envolvendo principalmente as variáveis: custo, tempo e qualidade. O fator crítico é saber previamente qual a quantidade de protótipos que devem ser fabricados e o grau de aproximação com que o protótipo será capaz de reproduzir as condições reais do componente.

A fabricação de um protótipo está muitas vezes vinculada à figura do modelista que é o profissional responsável em converter as formas de um desenho ou esboço em um objeto tridimensional. Estes profissionais que podem ser considerados artesãos, apresentam admirável habilidade manual e seus trabalhos resultam em representações quase perfeitas nas formas e aparência do produto final. Contudo, o tempo necessário para a fabricação de objetos de formas geometricamente complexas e, sobretudo, quando as propriedades mecânicas do protótipo precisam estar próximas das do material do produto final, característica comum aos protótipos integrais, é muito elevado. Desta forma, mesmo sendo importante para o desenvolvimento do produto, o excessivo tempo despendido na fabricação por técnicas convencionais às vezes inviabiliza o emprego de protótipos desta natureza [4].

O surgimento da prototipagem rápida⁹ (RP) em 1987, com o lançamento no mercado do processo de estereolitografia (SL), pela empresa 3D Systems, foi um marco para a produção de protótipos físicos. A partir deste momento, a simplificação do produto para facilitar a produção do protótipo não era necessária, pois, em linhas gerais, a geometria do produto deixou de ser uma barreira. Além disso, o processo proporcionou a construção de artefatos complexos de forma mais ágil comparados aos métodos convencionais de fabricação.

Posteriormente, surgiram outros processos de prototipagem rápida que, de forma análoga, adotam o mesmo método de construção, por adição de camadas, embora variem, sobretudo, na forma como as camadas são adicionadas e nos materiais empregados. A figura 3-1 apresenta em ordem cronológica o surgimento dos principais processos e fabricantes de máquinas de prototipagem rápida.

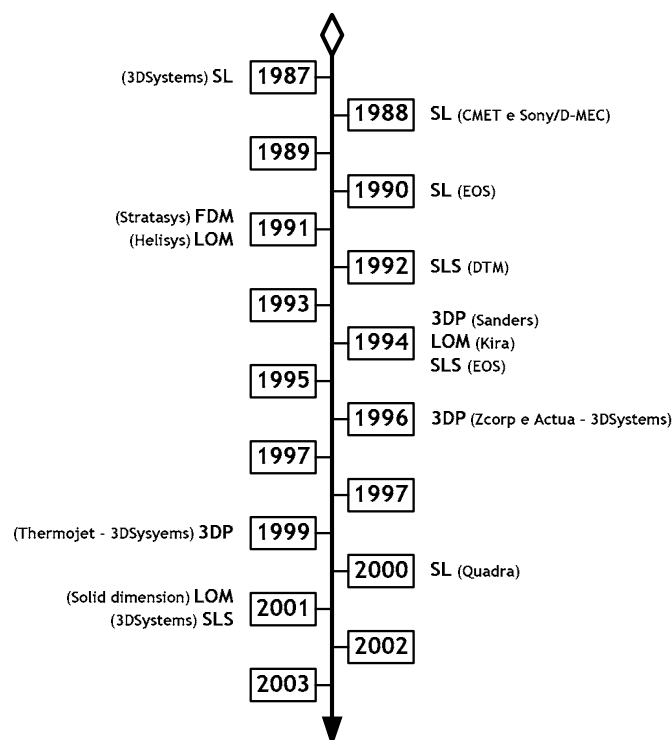


Figura 3-1: Principais processos e fabricantes de máquinas de prototipagem rápida distribuídos de acordo com o ano de surgimento no mercado

⁹ Também conhecida por *freeform fabrication*, *solid freeform fabrication*, *automated fabrication*, *solid imaging*, *additive manufacturing* e *layered manufacturing* [39] [40].

Cabe ressaltar que existe uma grande polêmica relacionada ao termo prototipagem rápida. A definição clássica sugere que o termo se refira somente aos processos onde a fabricação se dê por adição sucessiva de camadas. Por outro lado, uma definição mais abrangente sugere que o termo seja aplicado a qualquer processo que produza protótipos de forma mais rápida que os métodos convencionais de fabricação habitualmente usados [39]. De acordo com a segunda abordagem, por exemplo, a usinagem em alta velocidade é considerada um processo de prototipagem rápida. Neste trabalho será adotada a definição clássica.

A fabricação por adição de camadas, por via de regra, percorre uma seqüência composta de quatro etapas [41], ilustradas na figura 3-2. A primeira etapa compreende a modelagem da geometria em um software CAD 3D. A segunda etapa, conversão e transmissão de dados, é iniciada ainda no ambiente CAD, nele o modelo 3D CAD é convertido para um formato de leitura do software que realiza a preparação para construção que, na maioria das vezes, é o STL¹⁰. O software de preparação, responsável pela terceira etapa, emula o ambiente de construção da máquina de prototipagem rápida. Nele o modelo 3D STL é verificado, posicionado, orientado e, em processos como SL e FDM, são adicionadas estruturas de suporte às camadas. Em seguida, o software realiza o fatiamento simultâneo do modelo STL e suportes. O espaçamento entre as fatias corresponde à espessura de camada e quanto menor a espessura de camada maior a resolução do processo. Posteriormente, as informações geradas no processo de checagem e preparação são transferidas para a máquina de prototipagem rápida onde é iniciada a etapa de

¹⁰ Neste formato, a geometria do objeto, é convertida em uma malha de elementos triangulares, *Stereolithography Tessellation Language (STL)*.

fabricação propriamente dita, onde, uma a uma, as camadas são reproduzidas, até o objeto ser completamente construído.

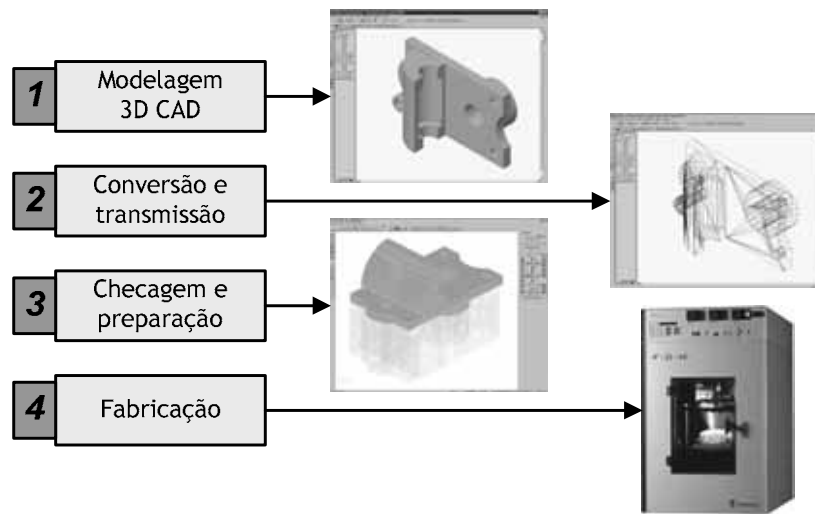


Figura 3-2: Ciclo genérico no processo por adição de camadas

Posteriormente, muitos processos de prototipagem rápida requerem ainda uma última etapa suplementar, a de pós-processamento, seja para a limpeza, remoção de suportes ou para a suavização da superfície em virtude do efeito escada, representado pela figura 3-3. Ele é resultado da característica descontínua da forma de fabricação por camadas. Quanto maior a espessura de camada maior serão os degraus, conseqüentemente pior o acabamento superficial. Durante a etapa de preparação, existem formas de compensação via software para evitar os excessos e ausências de materiais.

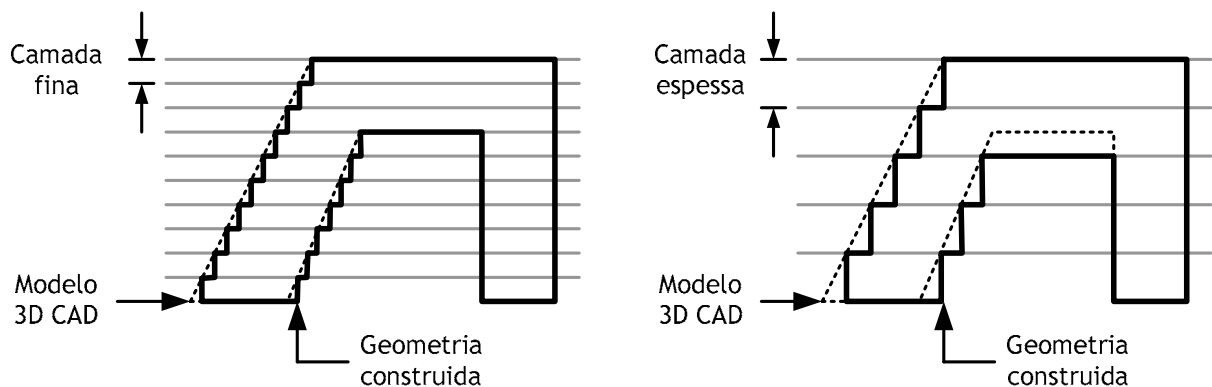


Figura 3-3: Ilustração esquemática do efeito escada

Em paralelo ao desenvolvimento dos processos de prototipagem rápida, surgiram estudos buscando o desenvolvimento de técnicas de produção rápida de séries limitadas de peças. O resultado destes estudos tornou possível, com a fabricação de ferramentas especiais, produzir peças em uma pequena fração do tempo requerido por processos de produção, tais como: moldagem por injeção, termoformagem, fundição, conformação, etc. Estas peças podem ser utilizadas como protótipos de pré-produção e em alguns casos como peças finais. Uma descrição mais detalhada sobre este assunto é apresentada no item 3.4.

3.2 Vantagens e desvantagens dos processos para a fabricação rápida de protótipos

Grande parcela das empresas, de variados segmentos industriais, tem incorporado protótipos rápidos ao processo de desenvolvimento de produtos. No caso das empresas que produzem produtos moldados por injeção pode-se dizer que o uso destas tecnologias, nos países desenvolvidos, é quase que uma regra [42]. A figura 3-4 apresenta as principais formas de utilização dos objetos produzidos por estes processos.

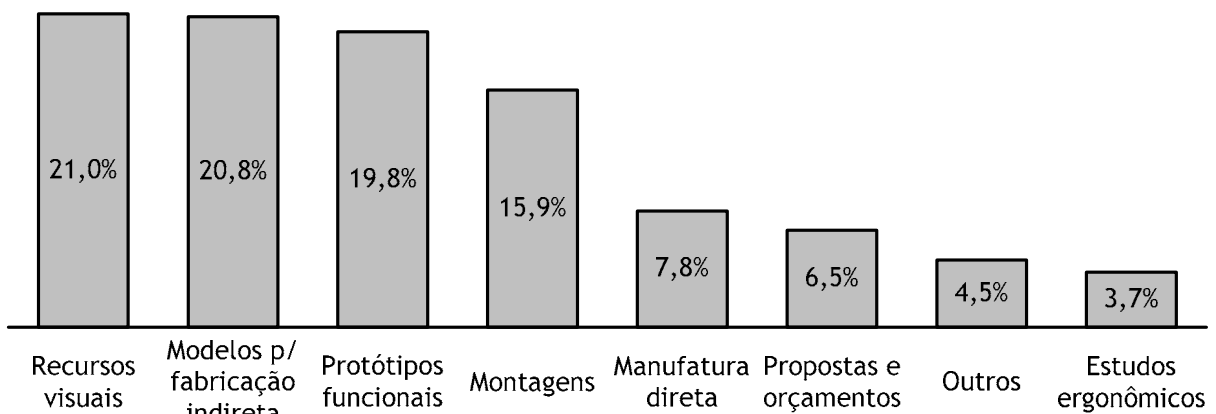


Figura 3-4: Principais usos dos protótipos rápidos (adaptada de Wohlers [24])

Em síntese, os benefícios advindos com a prototipagem rápida, somados aos da modelagem convencional, estão relacionados a substancial redução do tempo de fabricação do protótipo que é diretamente proporcional ao aumento da complexidade geométrica. Listados, a seguir, estão algumas das principais vantagens relacionadas à utilização da prototipagem rápida [41] [43] [44] [45]:

- ♦ Diminuição do tempo de desenvolvimento a partir da rápida fabricação do protótipo;
- ♦ Expectativa de aumento de qualidade do produto;
- ♦ Maior possibilidade de detecção de erros nas etapas iniciais do desenvolvimento;
- ♦ Redução nos custos de desenvolvimento de produto;
- ♦ Diminuição do tempo de desenvolvimento das etapas posteriores.

Assim como outros processos de fabricação, a prototipagem rápida apresenta algumas desvantagens, como:

- ♦ O alto custo de investimento no processo;
- ♦ O alto preço dos protótipos dificulta que pequenas empresas façam uso deste processo;
- ♦ Os processos normalmente não são adequados para protótipos de grandes dimensões (para-choques);
- ♦ As tolerâncias alcançadas, geralmente, são maiores que as dos processos de fabricação em massa;
- ♦ Os protótipos considerados funcionais apresentam as propriedades mecânicas diferentes dos componentes obtidos pelos processos convencionais.

3.3 Processos de produção em máquinas de prototipagem rápida

Os processos de produção individual atuais conseguem reprodução de alguns atributos do componente moldado por injeção. São utilizados para esclarecer dúvidas relacionadas à forma e à função. Os processos mais indicados são estereolitografia, sinterização seletiva a laser e modelagem por fusão e deposição [46].

3.3.1 Estereolitografia (SL)

Além de ser o primeiro processo comercial de fabricação rápida de protótipos que surgiu, a estereolitografia continua sendo mundialmente o processo mais utilizado de fotopolimerização e tem como principal vantagem a versatilidade.

Os protótipos são construídos através da polimerização, por laser, de uma resina líquida fotossensível, conforme o esquema da figura 3-5. A fabricação é dividida em duas etapas: construção e recobrimento. Na construção, as camadas são reproduzidas, individualmente, na superfície da cuba, pelo direcionamento do feixe, iniciando pelos contornos internos e externos e finalizando com as regiões delimitadas por eles. A incidência do laser promove a polimerização da resina, modificando seu estado físico de líquido para sólido. Depois da reprodução de cada camada, é iniciada a etapa de recobrimento que consiste na submersão da plataforma e posterior retorno para a posição de construção com um decréscimo correspondente à espessura de camada, variando de 0,025 - 0,150mm, conforme a máquina utilizada. Em virtude da característica de alta viscosidade das resinas uma lâmina percorre a área de trabalho uniformizando a superfície antes de iniciar-se a

construção da próxima camada. Este ciclo de construção e recobrimento é realizado até que todas as camadas estejam reproduzidas.

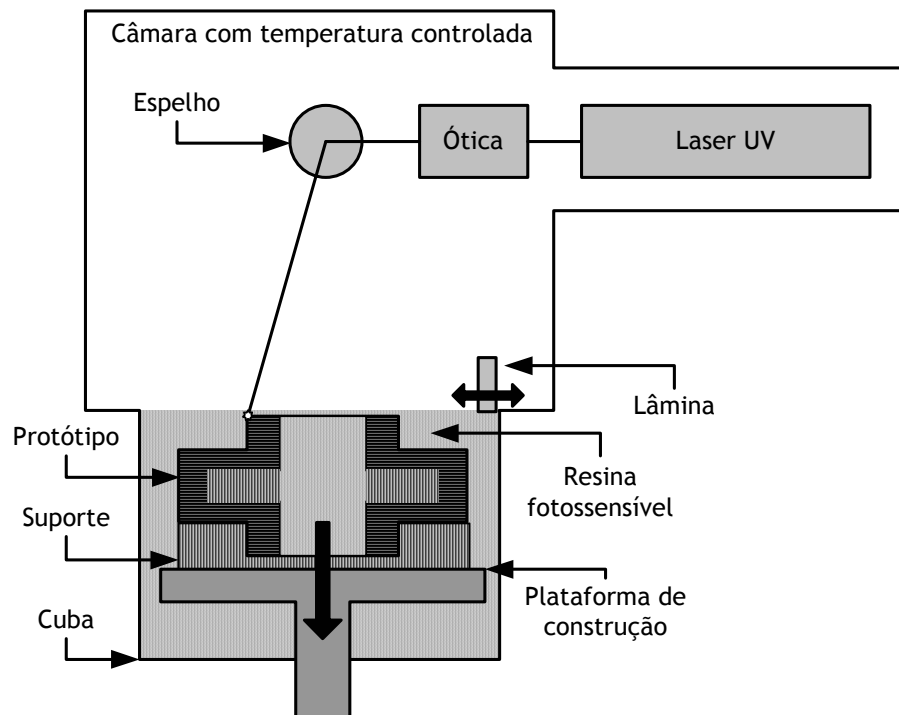


Figura 3-5: Esquema básico do processo de estereolitografia da 3DSystems

Uma condição indispensável ao processo é que as camadas estejam sempre ligadas com algum elemento de sustentação, principalmente, as regiões isoladas. Estas podem não estar em contato com a peça já construída e se dispersariam durante o recobrimento. Os principais elementos de sustentação são os suportes que são as primeiras estruturas criadas a partir da plataforma de construção e servem também como ancoragem para as camadas iniciais de construção.

Finalizada a construção, peça e plataforma emergem até uma determinada posição para que a maior parte da resina não polimerizada escorra. A parte restante deverá ser removida com uso de solventes apropriados. Os fabricantes recomendam que o operador utilize luvas, máscara e óculos protetores para não entrar em contato direto com a resina que no estado líquido pode ocasionar reações alérgicas.

Depois da limpeza, inicia-se a etapa de acabamento da peça com a remoção dos suportes restantes. Dependendo da espessura da camada utilizada, na construção e do uso posterior do protótipo, etapas de lixamento e jateamento de areia deverão ser realizadas para melhorar o acabamento superficial.

Dependendo da resina empregada, pode ser requerida ainda uma etapa de pós-cura. Neste caso, durante a etapa de construção a resina não foi completamente polimerizada resultando em uma “peça verde”. Geralmente, a polimerização final é realizada em câmaras de exposição à luz ultravioleta. Processos menos usuais utilizam calor e microondas.

- **Tempo de fabricação**

O processo SL, comparado a outros processos de prototipagem rápida, pode ser considerada de média a baixa velocidade. Ele apresenta eficiência baixa, já que o tempo necessário para realizar o recobrimento pode corresponder a quase dois terços do tempo total para fabricação. Por este motivo que o recobrimento também é conhecido como “tempo morto”. Este varia conforme o grau de viscosidade da resina, sendo que resinas mais viscosas aumentam ainda mais o tempo necessário para o recobrimento. Outro fator importante para o tempo de fabricação é a espessura de camada. Quanto menor a espessura, mais camadas precisarão ser reproduzidas e desta forma, maior tempo de fabricação será requerido. A orientação das peças na plataforma também influencia o tempo de fabricação. Quanto maior a cota maior o número de camadas que deverão ser reproduzidas. Os estilos de construção podem proporcionar variações no tempo total, já que uns são mais rápidos ou lentos que outros.

Existem também os aspectos relacionados ao pós-processamento. Somente a etapa de pós-cura, dependendo do volume do protótipo, pode levar de 1 até 10

horas [47]. A limpeza, extração dos suportes e acabamento são atividades trabalhosas, pois na maioria dos casos são realizadas manualmente e podem demandar um longo tempo conforme a geometria a ser trabalhada.

O tipo e potência do laser é um fator diretamente proporcional à velocidade de polimerização. Os lasers empregados em máquinas mais sofisticadas são de estado sólido e apresentam potência maior, em comparação com os de He-Cd utilizados nas máquinas mais despojadas.

▪ Máquinas e materiais

A maior produtora de máquinas de SL no mercado mundial é a norte americana *3D Systems*. São produzidos conjuntos que se diferenciam basicamente na capacidade (volume) e preço. *CMET* e *Sony/D-MEC* também produzem máquinas com tecnologia similar e a partir de 2003 começaram a atuar no mercado norte americano.

As primeiras resinas SL utilizadas apresentavam propriedades mecânicas limitadas. Eram tão frágeis que os protótipos raramente sobreviviam a uma reunião de revisão de projeto [47]. Observa-se que ainda hoje as resinas de SL são tratadas com um certo desdém. Alguns autores afirmam que os protótipos produzidos por estereolitografia são limitados em relação ao uso em testes funcionais [42]. Entretanto, há de se ressaltar que os maiores progressos em termos de propriedades físicas dos materiais para prototipagem rápida foram os obtidos para resinas fotossensíveis.

Existem três grandes fornecedores de resinas que tornam o mercado muito competitivo, isto, porque os fabricantes de máquinas não detêm a exclusividade na comercialização, como acontece com os outros processos.

Os usuários de SL contam com uma quantidade considerável de resinas, 51 no total [48]. Estão disponíveis no mercado resinas que emulam os materiais plásticos mais utilizados, como: PP, PE, PS, PC e ABS. Há também resinas transparentes, esterilizáveis e para aplicações em ferramental rápido.

▪ Aplicação do processo

Os protótipos de SL tendem a ser caros devido ao emprego de materiais caros e ao alto tempo de fabricação, já mencionados. A resina deve ser selecionada com critério. Ao escolher resinas que possuem propriedades próximas do produto final deve-se verificar se as mesmas não possuem problemas com absorção de umidade ou têm limitações quanto ao uso em altas temperaturas. Cabe ressaltar que as resinas fotossensíveis são termofixas e apresentam comportamento diferente de resinas termoplásticas. Contudo, o processo de SL ainda é a melhor escolha quando alta precisão dimensional e pequenos detalhes geométricos são requeridos.

3.3.2 Sinterização seletiva a laser (SLS)

Os protótipos produzidos por esta tecnologia são construídos através do aquecimento e fusão de partículas de polímeros.

Conforme a figura 3-6, as máquinas SLS distribuem sobre uma plataforma uma camada delgada de partículas. Em seguida, análogo ao processo de estereolitografia, um feixe de laser de CO₂ é direcionado sobre a plataforma reproduzindo a camada a ser fabricada. Ao contrário do processo de fotopolimerização, a energia do laser, de potência muito superior, ao longo de sua trajetória, promove o aquecimento e aderência entre as partículas adjacentes. Terminada a reprodução da camada, a plataforma desce no valor da espessura de

camada que varia de 0,10 até 0,15mm quando uma nova camada de partículas é distribuída sobre a plataforma.

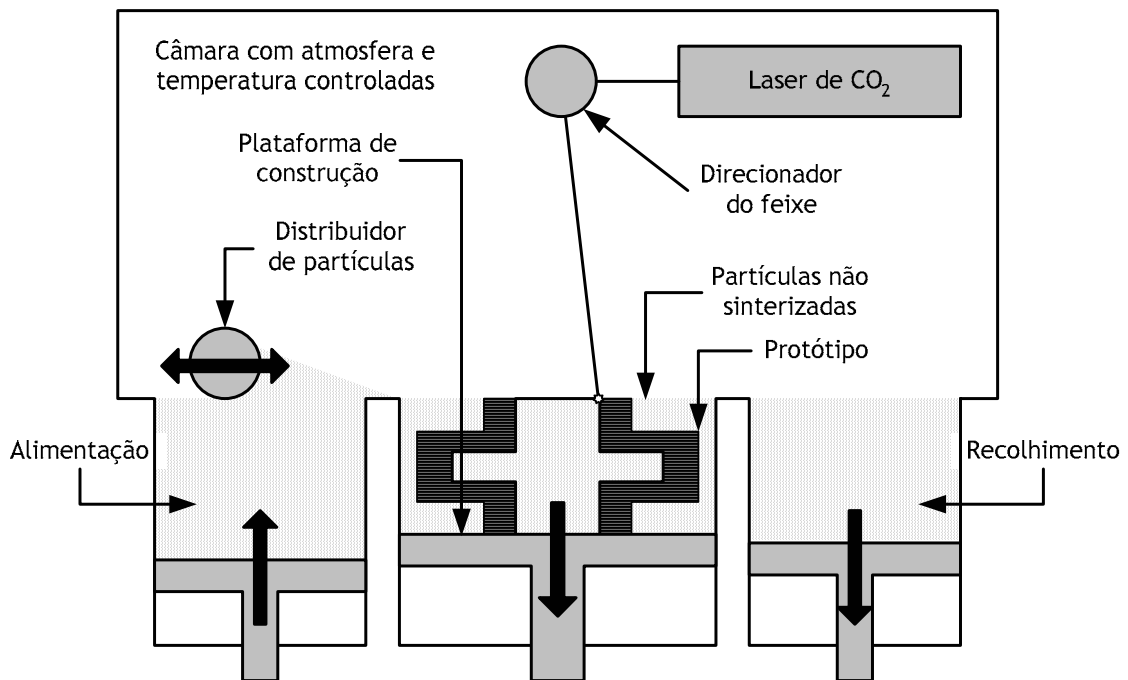


Figura 3-6: Esquema básico do processo de sinterização a laser, adaptada de [49]

Um aspecto fundamental para obter peças com boa precisão dimensional é o controle da quantidade de energia transferida para as partículas se unirem [49]. A temperatura da câmara deverá estar ajustada a um valor pouco abaixo da temperatura de fusão para que apenas uma pequena parcela de energia seja necessária para a sinterização das partículas.

O processo SLS não requer a construção de suportes, pois as próprias partículas que não foram sinterizadas promovem a sustentação necessária para as próximas camadas e regiões isoladas. Ao final da fabricação, o protótipo se encontra envolto em partículas não sinterizadas.

O pós-processamento no processo SLS em parte é facilitado pela ausência de suportes e pelas partículas se encontrarem no estado sólido. Apenas é preciso esperar que o protótipo retorne à temperatura ambiente para remover o excesso de partículas com auxílio de escovas e ar comprimido. Todavia, em aplicações onde

o apelo visual for um atributo relevante, o pós-processamento pode ser problemático. Comparada ao processo SL, o processo SLS proporciona um grosseiro acabamento superficial. Neste caso, devem ser realizadas etapas de lixamento para conferir melhor aparência.

- **Tempo de fabricação**

O tempo de fabricação do processo SLS é similar ao SL. A temperatura de fusão do material a ser sinterizado determinará a velocidade de varredura do laser. Desta forma, o processamento de materiais com baixo ponto de fusão é mais rápido. Além da temperatura de fusão outro fator que influencia no tempo de fabricação é a espessura de camada.

- **Máquinas e materiais**

Existem dois fabricantes principais de máquinas SLS no mercado mundial. A principal é a norte americana *3D Systems* que entrou neste segmento em agosto de 2001 ao adquirir a *DTM Corporation* e a sua concorrente é a alemã *Electro Optical Systems GmbH* (EOS). O princípio de sinterização pode ser considerado o mesmo, sendo que a diferença está na concepção das máquinas. A *3D Systems* desenvolve máquinas que podem sinterizar diferentes partículas (poliméricas, metálicas e cerâmicas) e a EOS máquinas específicas para cada classe de material.

Em teoria, qualquer material que possa ser reduzido em partículas e fundido pode ser usado [49]. Os materiais poliméricos comercialmente disponíveis são: PA, PA reforçado, PC, polímero a base de acrilato e elastômero, sendo os dois primeiros os mais utilizados.

Diferentemente das resinas fotossensíveis, as partículas para o processo SLS são oferecidas pelas próprias empresas fabricantes das máquinas.

▪ Aplicação do processo

Apesar dos protótipos produzidos por SLS não proporcionarem as mesmas propriedades físicas de um mesmo componente produzido por moldagem por injeção, o comportamento físico será o mais próximo em relação aos demais processos de prototipagem rápida. Desta forma, seriam aplicáveis testes mais severos. Entretanto, pode não ser o melhor processo para aplicações estéticas em decorrência do aspecto rugoso da superfície [49].

3.3.3 Modelagem por fusão e deposição (FDM)

A modelagem por fusão e deposição produz protótipos através da adição sucessiva de camadas de plástico fundido, conforme a figura 3-7. As camadas são reproduzidas na plataforma por meio de um cabeçote móvel controlado por um servomotor. O material termoplástico na forma de filamento é tracionado até o cabeçote que o aquece até atingir o ponto de fusão [50]. Em seguida, é direcionado a um bico que promove a sua extrusão e planificação sobre a superfície de construção. Quando o material fundido entra em contato com a superfície ele, rapidamente, se solidifica e adere sobre a mesma. O espaçamento entre os filamentos varia de 0,193 até 0,965mm sendo dependente do diâmetro do bico extrusor que não pode ser modificado durante a construção do protótipo. Ao finalizar a reprodução de uma camada o cabeçote de trabalho incrementa a distância correspondente à espessura de camada que varia de 0,178 até 0,356mm quando o processo de construção novamente é iniciado. Este ciclo se sucede até que todas as camadas estejam completamente reproduzidas.

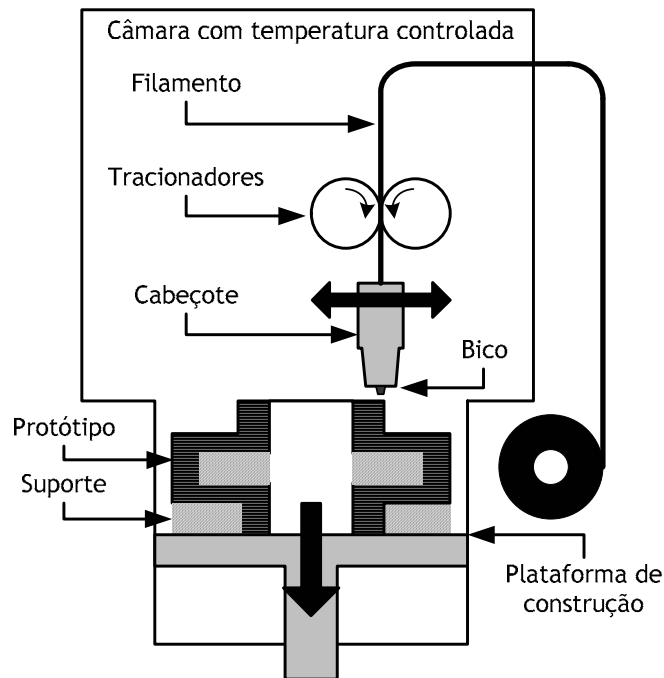


Figura 3-7: Esquema básico do processo de fusão e deposição de materiais (adaptado de Efunda [51])

O processo de FDM também requer o uso de suportes para a sustentação de regiões isoladas e suspensas. Desta forma, existe um cabeçote independente que constrói os suportes nos locais necessários. A empresa desenvolveu dois tipos de materiais para suportes. Nas máquinas mais despojadas é usada uma espécie de cera, já nas mais sofisticadas é usado um material que é solúvel em água.

▪ Tempo de fabricação

O tempo de fabricação é menor comparado aos processos anteriores. O “tempo morto” referente ao período entre a construção de duas camadas (incremento na cota) é menor. Mas, parte deste ganho é perdida com a construção de suportes. Outros fatores que influenciam no tempo de fabricação são: a espessura de camada, o espaçamento de construção, o diâmetro do bico de extrusão e o material de construção.

▪ Máquinas e materiais

A *Stratasys* é a empresa detentora dos direitos de comercialização de máquinas FDM. Os proprietários de máquinas FDM também estão sujeitos ao fornecimento de filamentos pela *Stratasys*, a mesma fabricante das máquinas. Ela praticamente detém o monopólio que faz com que o custo de aquisição, por quilograma de matéria-prima, seja o mais elevado entre os processos de prototipagem rápida descritos até o momento. O principal material utilizado no processo de FDM é o ABS. Pode ser utilizado em quase todas as máquinas, exceto na *Genisys* que opera apenas com poliéster. Dependendo da máquina, outros materiais que podem ser utilizados são cera, PC, elastômero e polifenilsulfona. Assim como o SL, o processo FDM conta com material esterilizável, o ABSi, para fins médicos. Ao contrário dos processos anteriores a FDM não conta com a mesma quantidade de materiais disponíveis. Todavia, a aposta no ABS se mostra apropriada por ser um material versátil e aplicável em testes funcionais mais rigorosos [50].

▪ Aplicação do processo

Ainda que os protótipos produzidos por FDM sejam produzidos por materiais termoplásticos, em média a resistência mecânica alcança 85% do valor do mesmo componente produzido por moldagem por injeção [41]. Além disso, o processo apresenta limitações principalmente em relação à precisão dimensional sendo inferior aos processos anteriormente descritos. Já a qualidade do acabamento superficial é considerada similar a do SLS, ainda que as camadas sejam percebidas visualmente ou por tato com maior facilidade. Mesmo assim, os protótipos de FDM possuem uma grande aceitação no mercado. O investimento na compra de uma máquina, geralmente, é menor. Além disso, ao contrário dos processos anteriores,

as máquinas FDM podem ser instaladas em ambientes de escritório e as matérias-primas utilizadas não requerem cuidados especiais. Estes são fatores que proporcionam ao processo FDM produzir protótipos com custos menores.

3.3.4 Modeladores conceituais

Os processos de prototipagem rápida descritos até o presente momento estão muito mais relacionados com a avaliação de funcionamento do produto do que com o desenvolvimento de soluções conceituais. Ainda que o custo de um protótipo fabricado por estes processos seja uma fração do custo de processos convencionais de fabricação, eles são muito custosos, razão pela qual, muitas empresas freqüentemente não os utilizam na fase inicial de desenvolvimento [22]. Neste estágio, geralmente executada por *designers*, são realizadas diversas iterações que requerem agilidade na fabricação dos protótipos [35].

Os modeladores conceituais surgem como uma solução alternativa para esta dificuldade. São utilizados para avaliar rapidamente se o projeto está no caminho certo [52] [53]. Dentre estes processos podem ser destacados os processos de fabricação por laminados e os processos de impressão tridimensional.

Os processos de fabricação por lâminas de papel são os mais comuns. Dentre eles se destacam o LOM (*Laminated Object Manufacturing*) e PLT (*Paper Lamination Technology*) que se caracterizam pela automatização da adição, colagem e corte de camadas de papel. As diferenças estão, basicamente, na forma com que as camadas são coladas e cortadas. No processo LOM, as camadas, por meio de uma película termoplástica localizada na parte inferior do papel, se aderem pela passagem de um rolo de laminação aquecido e são cortadas por um laser de CO₂. No outro processo, a aderência se dá por meio de uma prensa

aquecida e o corte é realizado por uma lâmina. A espessura de camada nos dois casos é representada pela espessura da folha de papel e do adesivo. Em ambos não são requeridos suportes, já que uma camada será sempre sustentada pela anterior. O ciclo de fabricação se repete até que o protótipo esteja completamente reproduzido. Posteriormente, as regiões que não fazem parte do protótipo são removidas manualmente. Existe ainda o processo comercializado pela Solidimension que fabrica protótipos através da aderência de lâminas de PVC.

Dentre os processos de impressão tridimensional que utilizam tecnologia similar às impressoras a jato de tinta, se destacam a 3DP (*Tri-Dimensional Printing*) e MJM (*Multijet Modeling*). Analogamente ao processo de sinterização a laser, o processo de 3DP espalha uma camada de partículas (a base de amido/celulose ou argamassa), mas em vez de sinterizar, um cabeçote deposita uma substância aglutinante (cera) que promove a união das partículas adjacentes. O processo de 3DP, assim como o processo SLS, não requer a adição de suportes. O processo MJM pode, em parte, ser considerado semelhante ao processo de FDM, porque fabrica protótipos pelo mesmo princípio, a fusão e deposição de um termoplástico. Entretanto, no processo MJM o termoplástico é depositado através de um cabeçote com múltiplos jatos independentes. Assim como o processo de FDM são necessários suportes durante a fabricação. O ciclo de fabricação, nos processos de 3DP e MJM, se repete até que o protótipo esteja completamente reproduzido. No processo de 3DP é necessário remover as partículas de pó não aglutinadas, enquanto no MJM é necessário remover os suportes.

De forma geral, quando precisão dimensional, qualidade superficial e propriedades mecânicas não são requisitos críticos, os processos de fabricação de protótipos conceituais são alternativas adequadas, como o exemplo mostrado na

figura 3-8. Os processos têm como principais vantagens, agilidade e baixo custo dos protótipos. Podem ser instalados inclusive em ambiente de escritório. Por serem mais econômicos, especialmente os processos que apresentam melhor precisão dimensional, MJM e Sanders (Híbrido de FDM e 3DP [41]), podem ser sub-etapas de um processo de produção seriada de protótipos.

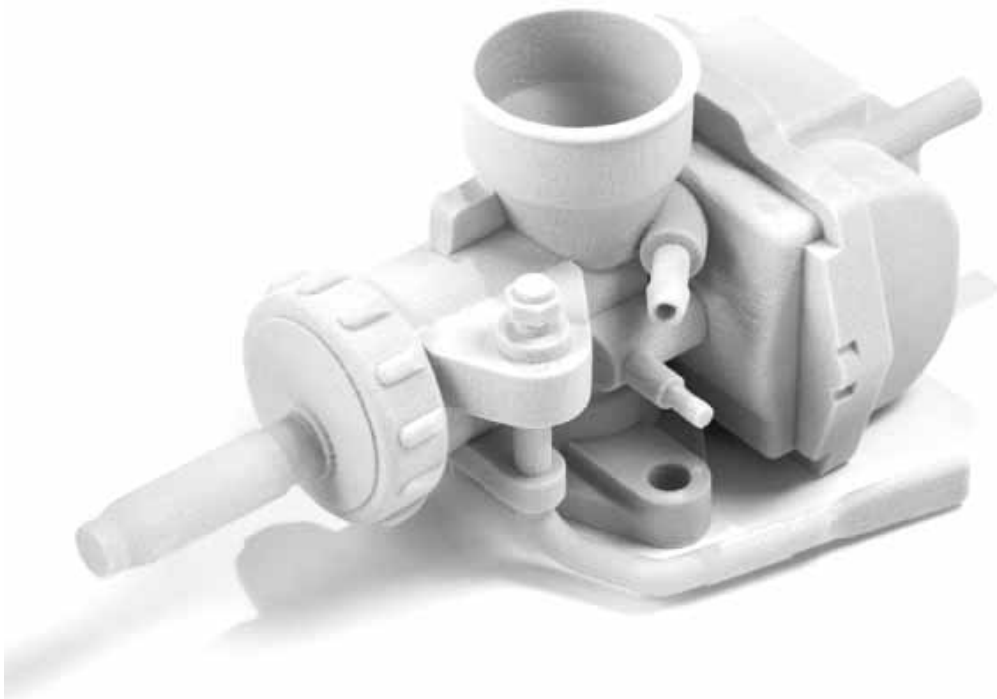


Figura 3-8: Protótipo conceitual produzido pelo processo 3DP, extraído de [44]

3.3.5 Comparação entre os processos de fabricação rápida de protótipos

Comparar os processos de produção de protótipos não é uma tarefa trivial, já que vários são os fatores que influenciam o processo. O gráfico comparativo representado pela figura 3-9, relaciona os quatro processos descritos, comparando-os conforme os parâmetros: velocidade de fabricação, precisão dimensional, acabamento superficial, custo do protótipo, materiais disponíveis e propriedades mecânicas características de uma peça moldada por injeção. O desempenho da

máquina é um fator de grande influência, sobretudo, sobre os quatro parâmetros iniciais. Desta forma, uma comparação somente faz sentido com máquinas de desempenho similar. Optou-se por avaliar as máquinas que apresentam o melhor desempenho em cada tecnologia (SLA 7000, SLS Vanguard si², FDM Titan e modeladora conceitual Z810) com os parâmetros de construção usuais (*default*).

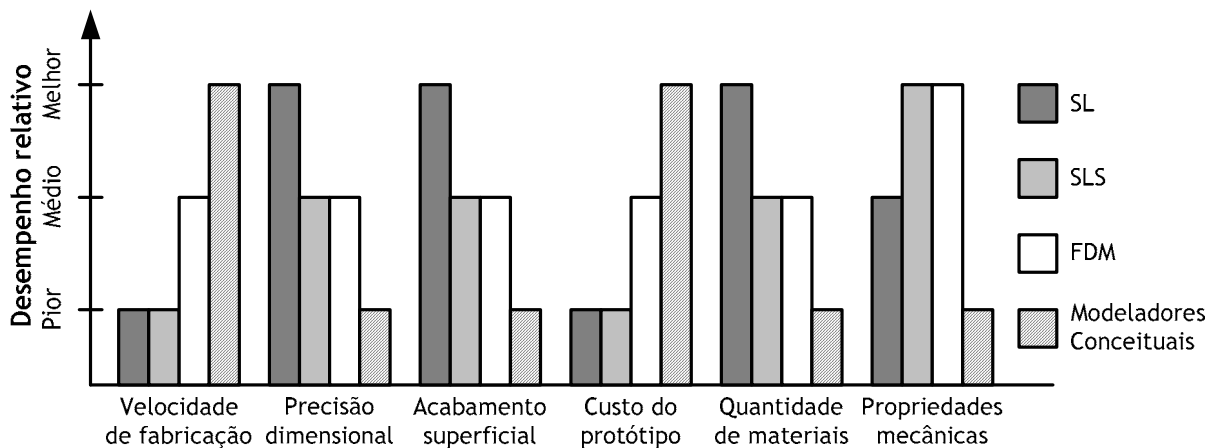


Figura 3-9: Gráfico comparativo entre os processos SL, SLS, FDM e 3DP

O gráfico supracitado apresenta de forma qualitativa alguns dos parâmetros que, provavelmente, farão parte da análise de compromisso para a escolha do processo de prototipagem rápida. A equipe de projeto deve estar ciente que a mudança dos parâmetros de fabricação pode alterar o desempenho relativo das tecnologias. Por exemplo, o aumento da espessura de camada proporciona a diminuição do custo do protótipo, em contrapartida, piora a precisão dimensional e acabamento superficial. Em alguns casos, o simples posicionamento do modelo STL na plataforma de construção, possibilita reduções consideráveis no custo do protótipo, com pouca influência na precisão dimensional e acabamento superficial.

3.4 Processos de produção de protótipos por ferramental rápido

Os atuais processos de produção de protótipos em máquinas de prototipagem rápida conseguem reprodução de alguns atributos de um componente moldado por

injeção. Características químicas, mecânicas, elétricas, térmicas e dimensionais só poderão ser avaliadas na totalidade com o próprio componente moldado com o material que será utilizado na produção [54]. Entretanto, o custo e o tempo requeridos para fabricação de um molde convencional para produção de pré-série de protótipos é uma prática normalmente inviável. No entanto, parte das características pode ser avaliada com auxílio dos processos de ferramental rápido. O estado atual de desenvolvimento pode não alcançar os níveis de desempenho dos processos convencionais de fabricação, razão pela qual estes protótipos não podem ser considerados amostras com rigor estatístico [55], porém, representam oportunidades de reduções de tempo e custo de desenvolvimento [24].

Existe uma quantidade variada de processos de fabricação rápida seriada de protótipos, embora somente alguns tenham se consolidado no mercado. Eles são classificados, de acordo com a técnica de obtenção, sendo indiretos ou diretos.

3.4.1 Processos indiretos

Nos processos indiretos de fabricação, o ferramental rápido é produzido a partir de modelos construídos por equipamentos de prototipagem rápida. Os resultados obtidos com os processos indiretos são influenciados, em grande parte, pelo modelo empregado, principalmente, em relação à precisão dimensional e acabamento superficial, conseqüentemente, a escolha adequada do processo de fabricação do modelo será um dos fatores de sucesso.

▪ Moldes de silicone

É um processo com grande aceitação no mercado que também é conhecido como molde RTV (*Room Temperature Vulcanization*). Apesar do processo já existir

há muito tempo, somente a partir do surgimento dos processos de adição sucessiva de camadas é que o interesse por esta tecnologia cresceu.

Em moldes de silicone, esquematizados pela figura 3-10, são necessários canais de alimentação e de respiro que podem ser acrescentados virtualmente via software CAD 3D e fabricados em conjunto com o modelo ou incorporados ao modelo separadamente. Para facilitar a separação das partes do molde é comum adicionar ao longo da linha de partição no modelo uma fita adesiva colorida. Em seguida, o modelo é disposto e fixado no interior de uma caixa apropriada. Depois despeja-se o silicone no interior da caixa que é levada a uma câmara de vácuo para eliminar bolhas e facilitar a reprodução de todas as características geométricas do modelo. Aguardado o tempo necessário para a vulcanização do silicone, é iniciada a separação do molde ao longo da linha de abertura. O modelo é removido e as partes do molde são reunidas novamente.

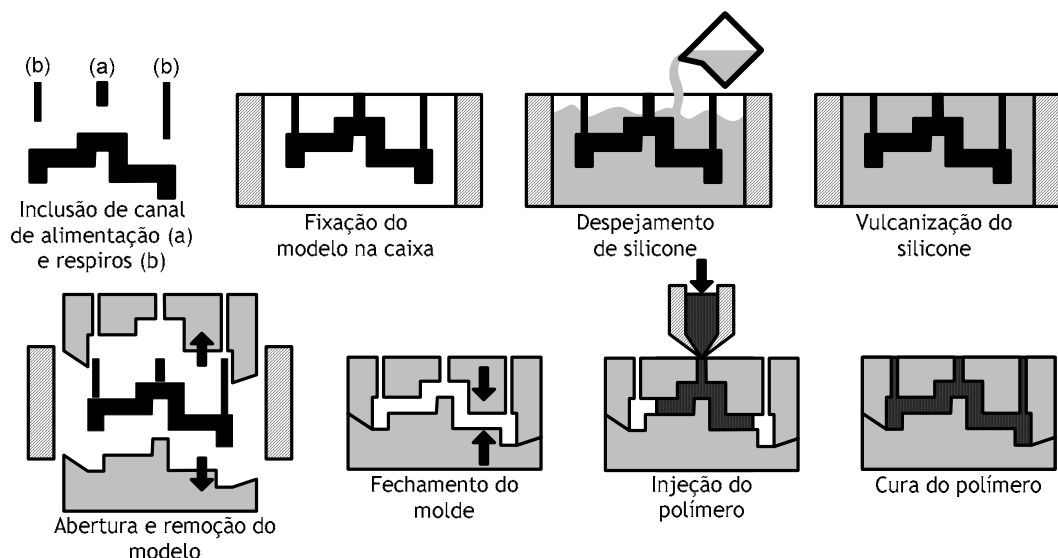


Figura 3-10: Esquema do processo de obtenção de protótipos através de moldes de silicone

Posteriormente, é injetado, com baixa pressão, através do canal de alimentação, um polímero termofixo que frequentemente apresenta uma formulação utilizando poliuretano. Existe uma grande variedade de formulações

que apresentam propriedades mecânicas semelhantes aos elastômeros, polipropilenos, polietilenos, ABS, poliamidas, acrílicos, entre outros. O tipo de formulação determinará as condições de processamento e ainda a utilização de vácuo (*vacuum casting*) ou não. Este processo que produz séries em torno de 20 peças, dependerá basicamente da quantidade de detalhes e do tipo de formulação [44].

Este processo não é recomendado para o uso de silicones opacos. Neste caso, as partes do molde são realizadas em duas etapas, conforme figura 3-11. Primeiro, o modelo é instalado sobre um bloco que corresponde à superfície de partição do molde. Em seguida, despeja-se o silicone sobre o modelo e o bloco. Após a vulcanização, a caixa é invertida, remove-se o bloco de partição e, finalmente, despeja-se o silicone sobre a parte faltante. Apesar de demandar um tempo adicional para a produção do molde, o silicone opaco é uma alternativa atrativa já que apresenta um custo de aquisição mais baixo.

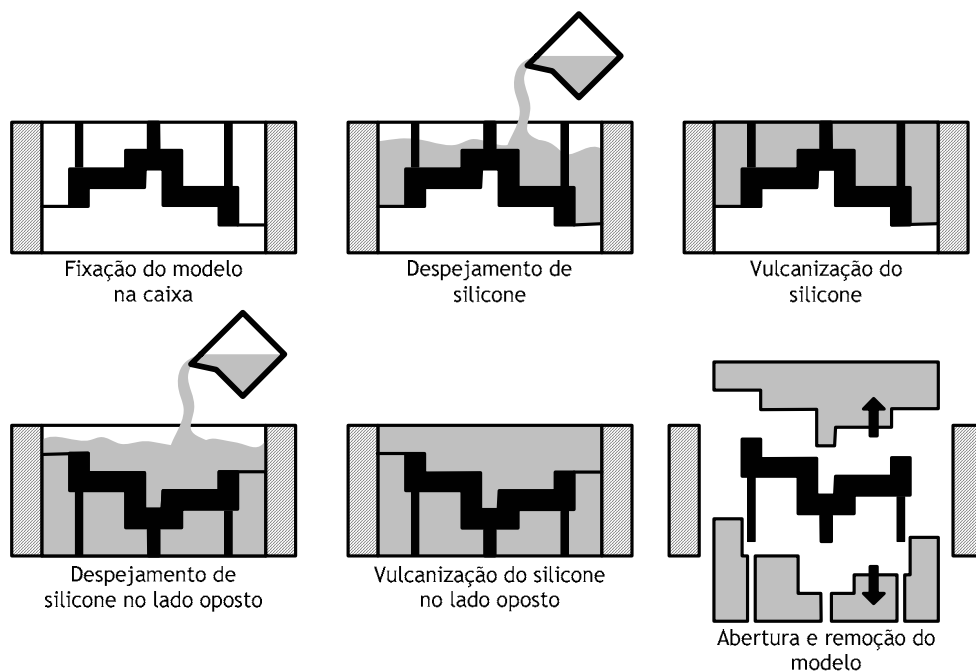


Figura 3-11: Esquema do processo de obtenção de moldes com silicone opaco

▪ Moldes à base de epóxi

Ferramentais à base de epóxi apresentam uma vantagem sobre os moldes de silicone que está na fabricação de pequenas séries de protótipos nos materiais finais de produção pelo processo de injeção. Desta forma insertos de epóxi podem ser montados em porta-moldes para posterior fabricação por processos de moldagem como, por exemplo, a moldagem por injeção. Embora, sejam empregadas condições de processamento relativamente inferiores, às propriedades mecânicas se aproximam daquelas obtidas por moldes convencionais, apresentando resultados satisfatórios na produção de componentes de baixa a média complexidade geométrica [24].

O processo, em si, é similar ao processo de obtenção de moldes de silicone opaco descrito anteriormente, no entanto, alguns procedimentos peculiares são empregados para atingir melhores resultados, como a utilização de desmoldante no modelo, bloco de partição e não necessitar de respiro. A inclusão de canais de resfriamento e a substituição de partes propensas à falhas no inserto por posições metálicas são implementos que favorecem o aumento da vida útil do molde. Orifícios destinados à bucha de injeção e pinos extratores devem ser previstos.

Os materiais utilizados nos insertos podem ser resinas constituídas apenas de epóxi ou formulações compósitas variadas, contendo, além de epóxi, e de partículas metálicas, geralmente alumínio que favorece a difusão térmica. Apesar de apresentar propriedades mecânicas inferiores, os insertos podem ser empregados na produção de protótipos de vários materiais termoplásticos, tais como, polietileno, polipropileno, ABS e poliamida. Com este processo é possível obter uma pré-série de até 500 peças.

▪ Moldes por deposição metálica

Os processos de fabricação de moldes por deposição metálica apresentam seqüência equivalente aos moldes de silicone opaco e epóxi. A característica peculiar deste processo consiste em formar uma casca metálica sobre o modelo e a caixa, para em seguida preenchê-la com resina epóxi, ilustrada pela figura 3-12. A casca metálica, com espessura em torno de 2 mm [44] [56], é normalmente composta de ligas de metais de baixo ponto de fusão (chumbo, alumínio, estanho, zinco, etc.), porém, as pesquisas estão direcionadas a metais de alto ponto de fusão (como os aços ferramenta P20, H13 e D2) [24].

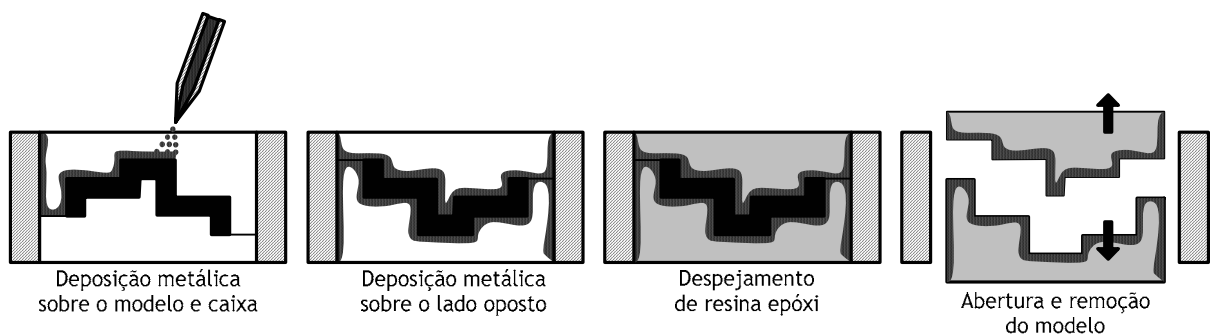


Figura 3-12: Esquema do processo de obtenção de protótipos através de moldes por deposição metálica

A casca metálica pode ser formada por duas principais técnicas de deposição: por aspersão e por arco voltaico. Na técnica por aspersão, os metais fundidos são conduzidos por ar comprimido e borrifados sobre a superfície do modelo. Na segunda técnica, um arco voltaico é formado no interior de uma pistola abastecida por dois eletrodos metálicos na forma de arames. O arco promove a fusão dos eletrodos e o material liquefeito é borrifado por ar comprimido. Em ambas as técnicas, a casca metálica pode ser formada diretamente sobre a superfície de modelos fabricados pelos processos de construção por adição de camadas. Porém, a temperatura sobre a superfície do modelo deve ser controlada, pois, em geral, os materiais empregados apresentam baixa temperatura de

transição vítrea e o aquecimento excessivo pode provocar o amolecimento e a distorção da geometria. Desta forma, a metalização da superfície do modelo, por técnicas de deposição química (galvanização) e a vapor, podem ser utilizadas a priori, para posteriormente proporcionar melhoria na condução e uniformização térmica [44].

O processo é mais adequado para a produção de componentes de baixa a média complexidade geométrica. Detalhes muito reduzidos são de difícil reprodução, contudo postigos metálicos podem ser incorporados ao inserto para reproduzi-los. Assim como ocorre com moldes de epóxi, os protótipos são fabricados por moldagem por injeção, proporcionando aos mesmos, propriedades mecânicas próximas das obtidas em moldes convencionais. A quantidade de itens reproduzidos por este processo, que normalmente fica entre 1.000 e 5.000 peças, é dependente da técnica e dos materiais utilizados e do cuidado durante o processamento [44].

▪ Outros processos indiretos

Os três processos descritos até então são capazes de produzir protótipos de pequena à média escala. Cabe ressaltar que existe um grande interesse em buscar alternativas que possibilitem a fabricação de moldes que produzam em alta escala. Processos de fabricação de moldes por microfusão e 3D Keltool possibilitam produções acima de 1.000.000 de peças, em prazos e custos menores, comparados aos processos convencionais.

Maiores detalhes sobre estes e outros processos indiretos para obtenção de componentes plásticos moldados por injeção em alta escala podem ser encontrados nas referências [24] [44] [56] [57].

3.4.2 Processos diretos

Os processos diretos não requerem a construção de um modelo para a fabricação do molde. O molde é diretamente produzido pelo mesmo processo de fabricação dos protótipos, ou seja, por camadas. Potencialmente, os processos diretos de ferramental rápido apresentam maior precisão dimensional e rapidez em comparação aos processos indiretos, já que apresentam menor número de etapas para fabricação.

- **Moldes SL**

Moldes SL¹¹ também são conhecidos como *Direct AIM* - (abreviação de *ACES*¹² *Injection Molding*), nome atribuído à primeira forma de obtenção direta de moldes para moldagem por injeção, pelo processo de estereolitografia, e apresentado comercialmente pela empresa 3D Systems em 1996 [56].

Apesar do procedimento de fabricação ser o mesmo que é utilizado para a produção de protótipos, conceber um molde requer cuidados adicionais. A começar pelo tipo de inserto: sólido ou em casca (figura 3-13). A construção em casca poupa custos com resina e laser que são consideravelmente altos, mas adiciona tempo maior de modelagem nos softwares CAD 3D, para incorporar reforços e ancoragens, além de uma tarefa a mais na etapa de pós-processamento, o preenchimento do vão traseiro.

¹¹ O uso desta técnica é objeto de estudo nos trabalhos [56], [57] e [58] realizados no Cimject.

¹² Abreviação de *Acurate Clear Epoxy Solid* que é um estilo de construção utilizado no processo de estereolitografia.

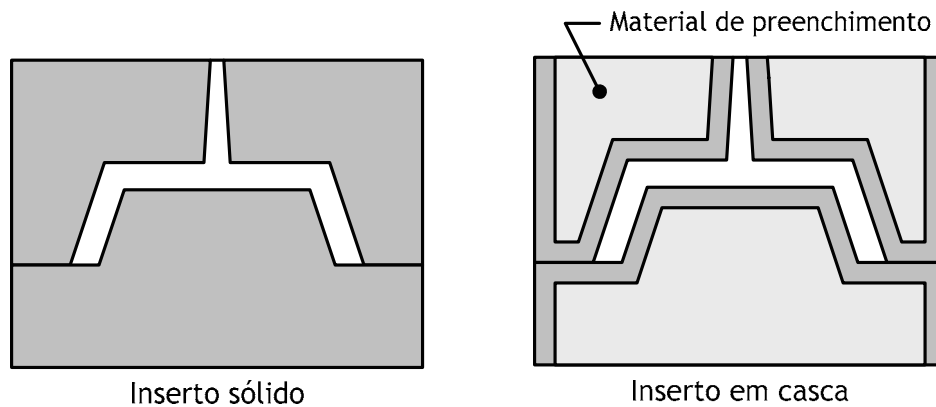


Figura 3-13: Representação dos insertsos tipo sólido e em casca

O resfriamento do molde é também um quesito muito importante, já que as resinas fotopoliméricas, de modo geral, apresentam temperatura de transição vítrea (T_g) muito baixa, além de baixa condutividade térmica. Desta forma, ao empregar insertsos SL, geralmente é tomado o cuidado com o patamar da T_g para evitar a falha do inserto em decorrência da diminuição acintosa das propriedades mecânicas. Estes fatores favorecem o aumento do tempo do ciclo de moldagem e limitam a aplicação do processo à de materiais termoplásticos com temperaturas de trabalho mais baixas. Nos insertsos em casca, os procedimentos para o preenchimento e inclusão de canais de resfriamento são idênticos aos utilizados nos moldes de epóxi. Existem recomendações para o projeto do sistema de alimentação, em especial, do ponto de injeção e do sistema de extração. Estas são algumas das questões que devem ser observadas para evitar que o inserto esteja susceptível a uma falha precoce.

Em geral, as diferenças na moldagem em moldes SL podem afetar a estrutura morfológica dos protótipos, com influências na contração e nas propriedades mecânicas [24]. Entretanto, um estudo ainda não publicado pelo Cimject apresenta uma comparação entre corpos de prova de PP moldados por injeção em insertsos convencionais (em aço) e em insertsos SL onde os resultados

advindos de ensaios de tração e dureza não apresentaram diferenças significativas nas propriedades mecânicas.

A quantidade de protótipos produzidos varia conforme a complexidade geométrica, o material a ser injetado e o material com que o molde foi produzido, normalmente são obtidos em média 20 protótipos, podendo alcançar 200 no caso de geometrias mais simples. Os materiais que apresentam melhores resultados são aqueles de menor ponto de fusão, como por exemplo, PE e PP. Embora esteja em um patamar superior de temperatura, o ABS também apresenta bons resultados. Alguns autores também reportam bons resultados utilizando poliamidas [24].

▪ **Insertos por sinterização a laser**

Estes processos apresentam basicamente a seqüência para obtenção de protótipos de plástico através do processo SLS e são mais indicados para obtenção de componentes plásticos moldados por injeção de média à alta escala.

Existem dois processos principais que apesar de serem similares na obtenção de protótipos plásticos, diferem quando se trata da obtenção de insertos metálicos. O processo mais utilizado que fora desenvolvido inicialmente pela DTM Corp e a partir de agosto de 2001 é comercializado pela 3D Systems, utiliza partículas metálicas, recobertas por um aglomerante polimérico que funde-se e promove a união das partículas durante o processo de construção na máquina de sinterização a laser. O resultado é um inserto “verde” que deve passar, em seguida, por etapas de remoção do aglomerante e sinterização das partículas metálicas. Em consequência da remoção do aglomerante, o inserto apresenta alta porosidade. Desta maneira, deverá passar por uma etapa de infiltração por efeito de capilaridade, usualmente de cobre ou bronze, para aumento da resistência mecânica. O resultado é um inserto compósito (60% de Cobre e 40% Bronze) que

segundo o fabricante, possui características similares ao aço P20 [59]. O processo desenvolvido pela EOS e denominado de sinterização a laser direta de metais (DMLS - *Direct Metal Laser Sintering*) e como o próprio nome sugere, não necessita de etapas de remoção, sinterização e infiltração do inserto após a fabricação. Os insertos podem ser fabricados a partir de partículas de aço e bronze.

Apesar do processo direto apresentar melhor acabamento superficial, em ambos é necessário realizar etapas de acabamento final por processos convencionais de usinagem. Além da rapidez na produção de insertos, estes processos apresentam uma grande vantagem que é a incorporação direta de canais de resfriamento nos insertos (*conformal cooling*) que possibilita reduções consideráveis no tempo de ciclo de moldagem por injeção.

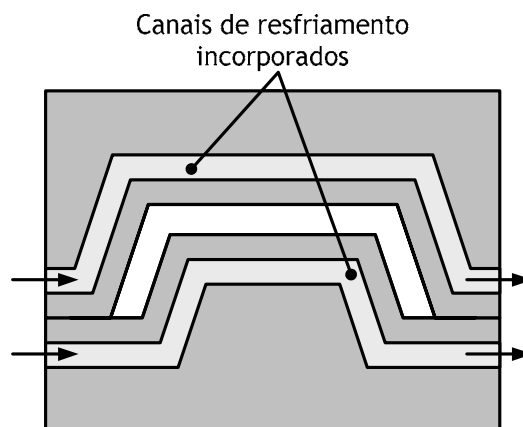


Figura 3-14: Representação de insertos com canais de resfriamento incorporados

3.4.3 Comparação entre os processos de fabricação por ferramental rápido

Para que se possa ter uma rápida indicação das potencialidades de cada processo, na figura 3-15 estão comparados os processos de ferramental rápido apresentados nos itens anteriores, de acordo com os dados obtidos por WOHLERS [24]. No lado esquerdo, tem-se o tempo requerido para o recebimento do lote de protótipos e no lado direito, a vida típica do ferramental rápido, ou seja, o número

médio de protótipos que poderá ser obtido em cada processo. Estes dados consideraram a produção de um inserto cúbico de 125mm de aresta. Apesar disso, não apresenta a geometria do inserto que é um fator de grande influência na fabricação do ferramental e no tamanho do lote obtido. Assim, para uma comparação mais eficaz, informações mais precisas quanto ao prazo, lote e custo deverão ser consultadas junto aos fornecedores de protótipos.

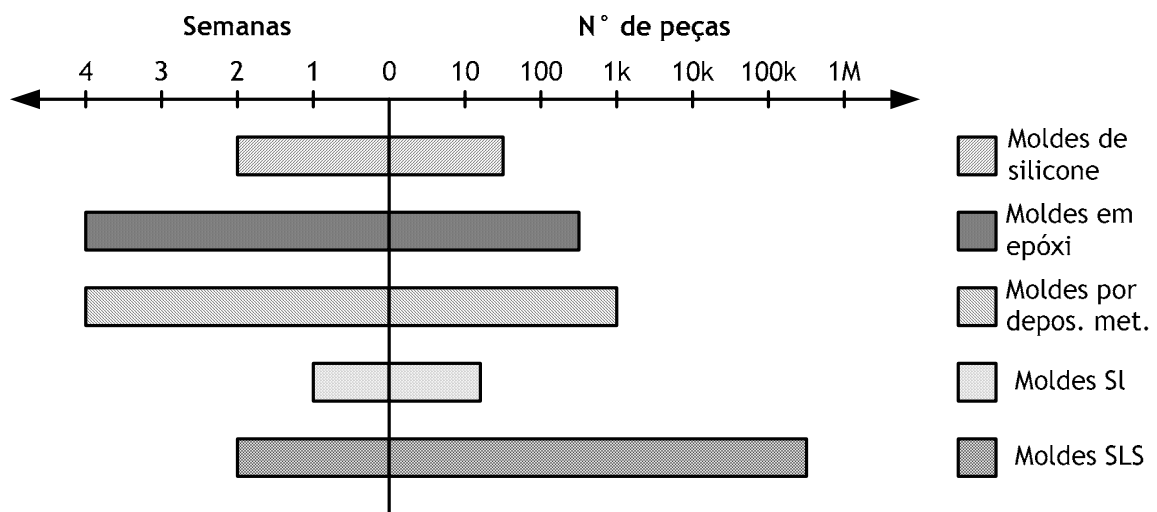


Figura 3-15: Gráfico comparativo entre os processos de fabricação de ferramental rápido

3.5 Prototipagem rápida no Brasil

Os processos de prototipagem rápida foram introduzidos no Brasil a partir da década de 90. Neste período, muitas empresas têm se utilizado desta ferramenta no desenvolvimento de seus produtos, sobretudo nas empresas de médio a grande porte. Algumas, inclusive, adquiriram e fazem uso de equipamentos desta natureza. São exemplos, empresas como Embraer, General Motors, Gradiente, Arno, Multibrás e Daimler-Chrysler. Para estas empresas os protótipos rápidos representam uma alternativa para manter a competitividade, já que, seus produtos precisam disputar mercado com exemplares nacionais e estrangeiros. Além da questão competitiva existe a questão cultural. A maioria das empresas supracitadas

é do tipo multinacional e possui matriz em país desenvolvido. Esta característica favorece a constante revisão e modificação das práticas de desenvolvimento de produtos, em particular, a adoção de novas ferramentas de projeto, como é o caso da prototipagem rápida.

Observa-se na prática que os processos de prototipagem rápida ainda estão distantes da grande maioria das empresas brasileiras. Muitas delas sequer sabem da existência de tais processos. Atitude esta esperada uma vez que empresas, inclusive de grande porte, ainda estão implantando ferramentas 3D CAD e desenvolvem a cultura da cópia [34]. Estados Unidos, Japão, Alemanha, China e Reino Unido foram os 5 países maiores compradores e detinham em 2002 aproximadamente 80% de máquinas [24]. Apesar de regionalmente possuir 57% do total de 54 máquinas instaladas na América Latina, a participação do Brasil no mercado mundial representa somente 0,4% do total de 7819 máquinas vendidas até 2002, como mostra a tabela 3-1.

Tabela 3-1: Principais compradores de máquinas de prototipagem rápida [24].

Ordem	País	Máquinas Instaladas [un.]	Participação [%]
1°	Estados Unidos	3350	42,8
2°	Japão	1466	18,7
3°	Alemanha	729	9,3
4°	China	371	4,7
5°	Reino Unido	340	4,3
19°	Brasil	31	0,4

Dentre as razões prováveis para esta tamanha disparidade está a não existência de um único fabricante nacional de equipamento e suprimentos para este segmento de mercado. As taxas de importação e a diferença cambial do real

perante o dólar são fatores que desfavorecem a importação destes equipamentos por empresas de pequeno e médio porte. Uma das máquinas de menor custo, como a ZPrinter 301 é vendida por US\$ 29.900 nos Estados Unidos.

Conforme mostra o gráfico da figura 3-16, das 31¹³ máquinas instaladas no Brasil 52% delas são baseadas no processo FDM. Em seguida, com 19% estão as máquinas que produzem protótipos conceituais, opções de menor custo. As máquinas baseadas nos processos SL e SLS ocupam as últimas posições com 16% e 13%, respectivamente.

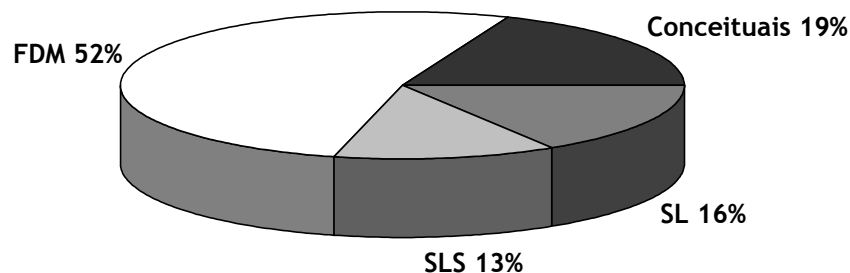


Figura 3-16: Participação dos processos no mercado brasileiro

A distribuição de máquinas no mercado brasileiro pode ser observada no gráfico da figura 3-17. A maioria das máquinas de prototipagem rápida está localizada em grandes empresas que apresentam demanda suficiente de protótipos para justificar a compra de máquinas deste porte. As empresas de menor porte ou de baixa demanda por protótipos podem contar com prestadores de serviços nesta área (ver APÊNDICE A). No entanto, apenas um deles possui máquinas de construção por camada, a Robtec situada em São Paulo. Os demais produzem o protótipo a partir de processos convencionais ou sub-contratam a construção do mesmo com instituições de ensino e pesquisa que também oferecem o serviço.

¹³ Levantamento realizado pelo Grupo de Prototipagem Rápida da rede MANET, projeto Recope/Finep em novembro de 2002.

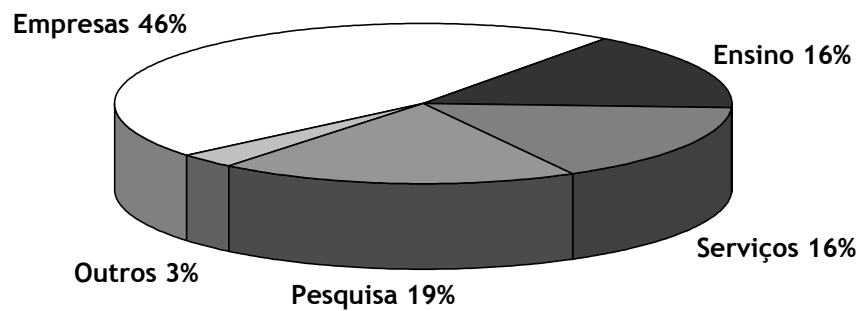


Figura 3-17: Localização das máquinas no mercado brasileiro

Os processos de fabricação de ferramental rápido no Brasil mais utilizados são os realizados por meio de técnicas indiretas a partir de modelos produzidos por processos de prototipagem rápida e também pelos processos convencionais de fabricação, por exemplo, usinagem CNC. Neste segmento se destacam as técnicas de fabricação em moldes de silicone e moldes em epóxi. O uso de técnicas diretas está muito restrito já que apenas um prestador de serviço dispõe de máquinas capazes de produzir os moldes. Como a maioria das máquinas está localizada dentro de empresas, informações referentes às aplicações destas tecnologias ficam restritas ao ambiente interno das mesmas.

Contrariando uma tendência mundial, existem poucas instituições realizando pesquisas na área de aprimoramento, desenvolvimento e nacionalização destas tecnologias. Recentemente, foi criado o Grupo de Prototipagem Rápida (GRP) sob coordenação da UFSC/Cimject, uma sub-área de grupos de pesquisa da MANET¹⁴ que objetiva a cooperação e parceria de instituições que atuam na área. Atualmente, o grupo conta com 8 instituições, todas possuidoras de máquinas de

¹⁴ Manufacturing Automation Network - Rede científica que integra algumas instituições brasileiras de pesquisa envolvendo o tema automação da manufatura. Mais informações em: <http://www.manet.org.br>

prototipagem rápida, sendo que um dos objetivos é o desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida nacional.

CAPÍTULO 4 - ESTUDOS DE CASO

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, o uso de protótipos para avaliação de soluções é cada vez mais importante por parte das equipes de projeto quando a meta está orientada ao desenvolvimento rápido de produtos. Dada esta importância, torna-se necessário estabelecer uma sistemática que reúna informações que estão dispersas na literatura.

Neste contexto, este capítulo apresenta estudos de caso que, na prática, objetivam a identificação das principais etapas, bem como as entradas e saídas existentes e promoveram subsídios para a elaboração da proposta de sistemática apresentada no capítulo seguinte. Desta forma, foram realizados dois estudos distintos: no primeiro, a equipe responsável pela fabricação dos protótipos não fazia parte da equipe de desenvolvimento do produto e no segundo, a mesma equipe responsável pelo desenvolvimento do produto fabricou os protótipos.

4.1 Estudo de caso 1

A equipe de projeto de uma empresa se encontrava na fase preliminar de desenvolvimento de um produto moldado por injeção e trabalhava simultaneamente com duas concepções. A data limite para o início da fabricação do molde estava próxima, desta forma, precisava decidir qual opção melhor atendia aos requisitos de projeto.

O produto se tratava de um lacre de segurança que na posição fechado, adquire o formato circular com regiões de dobra localizadas nos quadrantes deste círculo, conforme ilustra a figura 4-1. O produto tinha como função fundamental evidenciar uma possível violação que é demonstrada com a ruptura de alguma das quatro regiões de dobra. Desta forma, as regiões deveriam ser suficientemente

robustas para suportar a dobra prescrita, porém frágeis na tentativa de alguma violação.

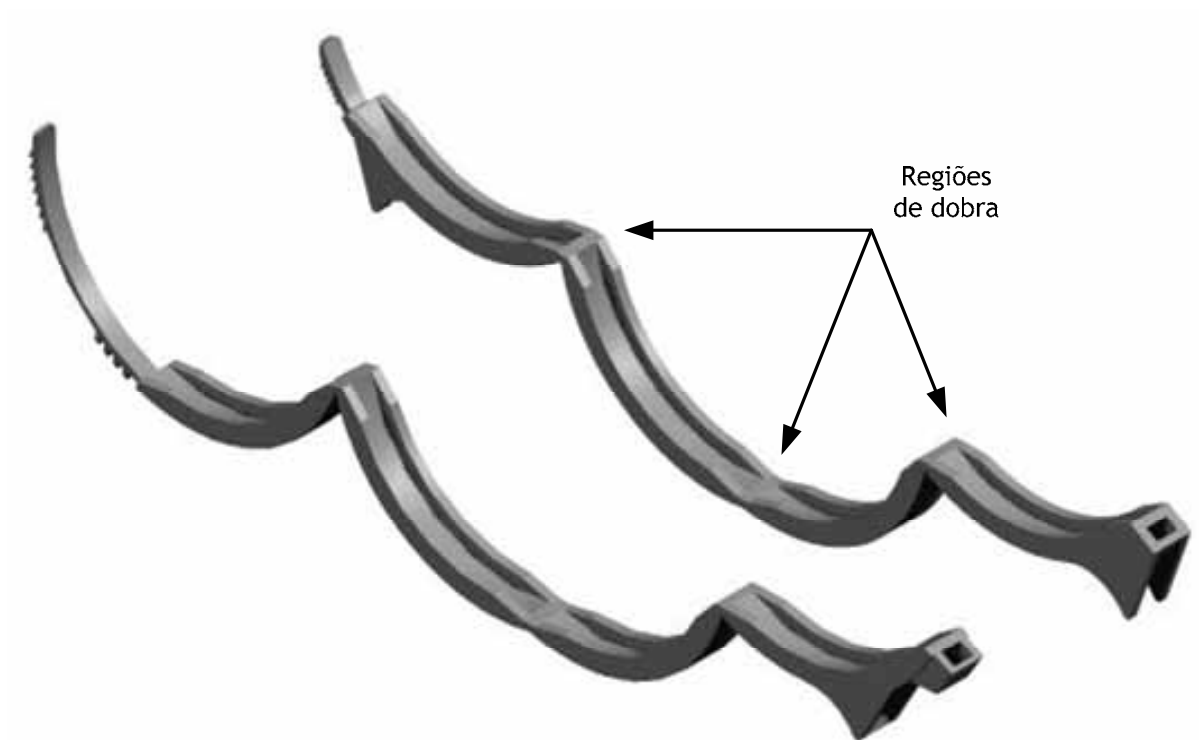


Figura 4-1: Modelos 3D CAD das duas concepções do produto fornecidos pelo cliente

Devido às características supracitadas uma maneira adequada para avaliar as concepções seria através de teste funcional com protótipos moldados por injeção no material utilizado para futura fabricação do produto. Contudo, o uso de moldes convencionais mostrou-se inviável, principalmente, devido aos altos custos de fabricação e o tempo para produção que excederam os valores de orçamento e prazos disponíveis.

A empresa consultou o Cimject na busca de uma alternativa para a avaliação das concepções através da fabricação de protótipos rápidos. Após uma breve análise do problema foi explicado que os protótipos produzidos por processos de prototipagem rápida não desempenhariam uma avaliação desta natureza de forma adequada. Os materiais que geralmente são empregados nos processos SL, SLS e

FDM, apresentam propriedades distintas ao material selecionado para os lacres que inviabilizariam o teste funcional. No entanto, sugeriu-se a fabricação de protótipos em ferramental rápido para moldagem por injeção. Optou-se pelo processo *Direct AIM* ou moldes SL, baseado no menor tempo requerido para a fabricação do inserto e na baixa quantidade de protótipos necessários (10 unidades para cada geometria).

4.1.1 Desenvolvimento do ferramental rápido

O desenvolvimento do ferramental rápido foi iniciado pela elaboração do plano de projeto (figura 4-2). Com base em experiências anteriores no desenvolvimento de ferramentas deste tipo foram previstas as atividades, bem como, os prazos necessários para executá-las. Segundo o plano de trabalho os protótipos seriam entregues ao cliente, com boa margem de segurança, no prazo de oito dias úteis. Após a conclusão do plano de trabalho, foi estabelecida uma equipe de trabalho composta de três integrantes para o desenvolvimento e realização deste serviço no prazo estipulado.

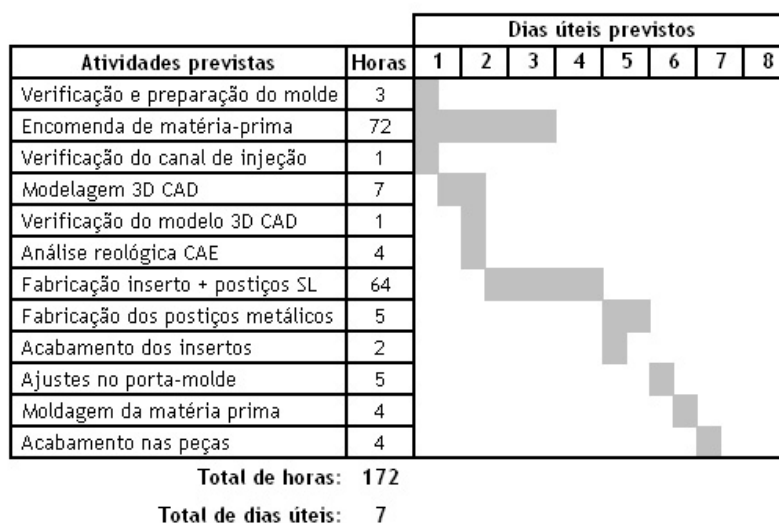


Figura 4-2: Plano de projeto para fabricação dos protótipos em ferramental rápido

A partir dos modelos 3D CAD enviados pela empresa constatou-se que a geometria de um dos lacres poderia ser modificada. Esta modificação, à princípio não traria problemas para o lacre, pelo contrário, facilitaria a fabricação do inserto e, sobretudo, a moldagem dos protótipos. As modificações foram sugeridas e aceitas pela empresa contratante.

Após um exame minucioso dos porta-moldes disponíveis ficou definido que os dois lacres seriam injetados simultaneamente, sendo que, o inserto SI seria instalado no lado móvel do molde e contraporaria uma placa plana de aço. Em decorrência da complexidade geométrica, o inserto seria concebido na forma de *puzzle mold* (molde quebra-cabeça), conceito que consiste de uma série de postigos localizados em áreas de difícil extração ou onde seriam requeridas gavetas que ao final de cada ciclo de injeção, durante a fase de extração, são retirados do inserto junto com a parte moldada. Em seguida, os postigos são manualmente separados da parte moldada e novamente instalados no inserto para aguardar um novo ciclo.

Algumas simulações em CAE do processo de moldagem por injeção foram realizadas para determinar a localização mais adequada do ponto de injeção para o balanceamento do molde (figura 4-3). A partir das simulações foi possível determinar alguns dos parâmetros de processamento mais pertinentes (velocidade de injeção, pressão de injeção e volume de injeção) para os materiais selecionados para o produto (PP e PEBD). Em virtude da elevada pressão decorrente das súbitas mudanças de espessuras nas posições de dobra julgou-se prudente a inclusão de postigos de alumínio nestas regiões.

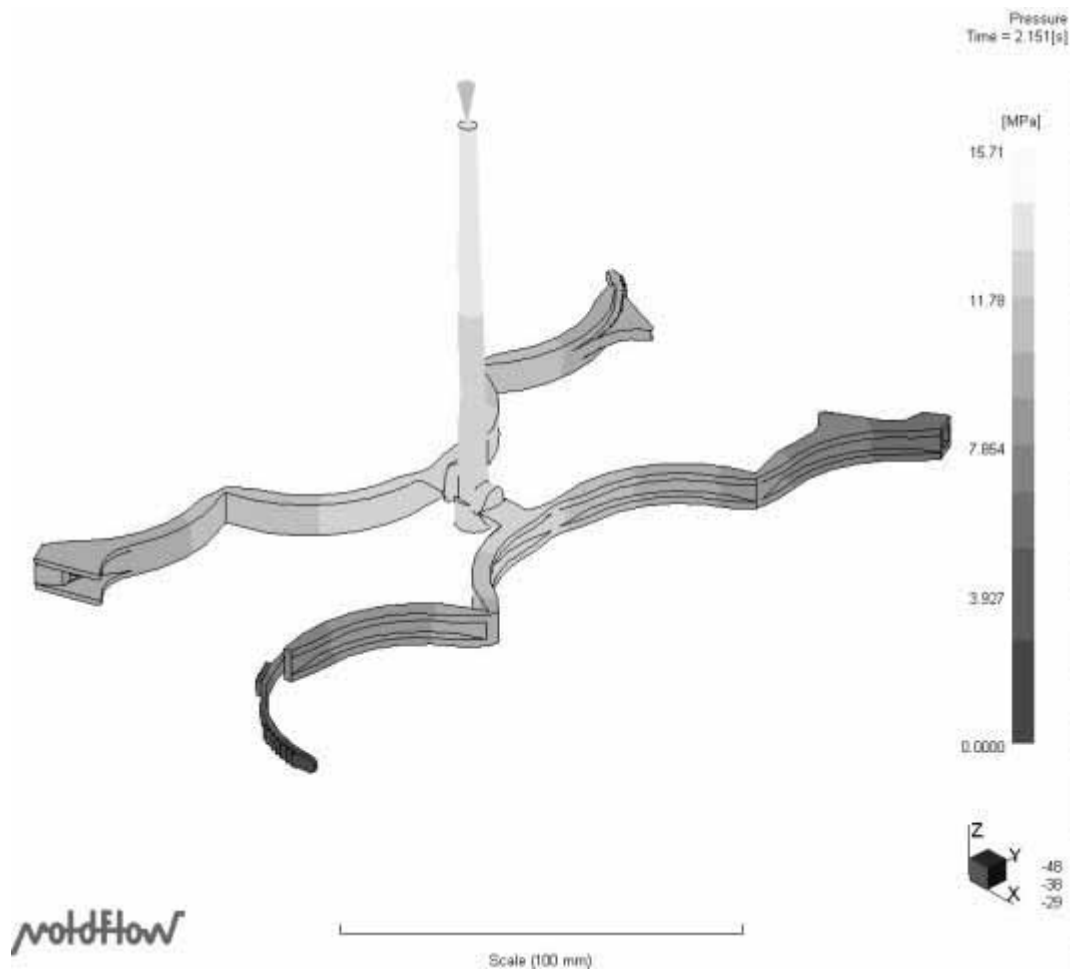


Figura 4-3: Resultado de distribuição pressão realizada em sistema CAE

Os resultados advindos das análises CAE foram empregados no projeto do inserto. O inserto foi concebido em ambiente 3D CAD considerando uma compensação de contração média de 2% (0,02mm/mm) [60], conforme ilustra a figura 4-4. Devido a restrições do porta-moldes utilizado foi possível adicionar um único extrator para o canal de distribuição. Por questões econômicas decidiu-se construir o inserto em casca (2mm) para posterior preenchimento do vão traseiro por uma resina de menor custo. Em virtude do baixo volume de produção e alto tempo de ciclo, optou-se por utilizar inserto sem canais internos de resfriamento.

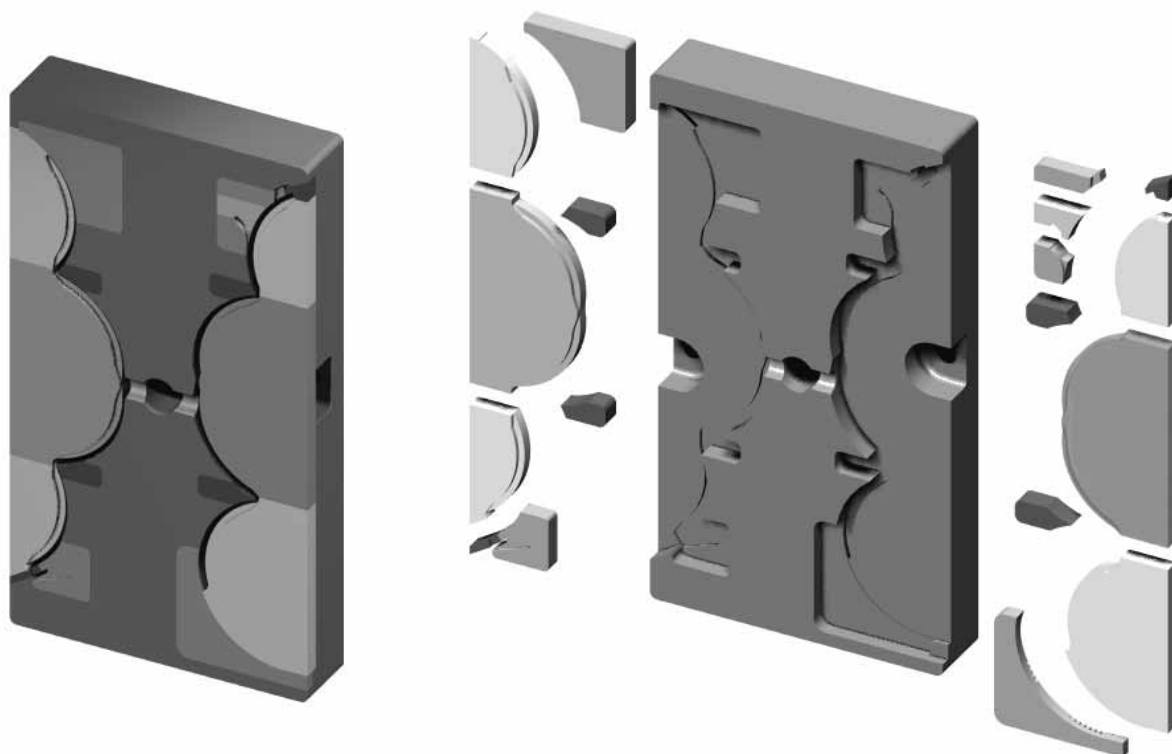


Figura 4-4: Modelo 3D CAD do conjunto (inserto e postigos) e vista explodida

Após a verificação da integridade do modelo 3D CAD, do inserto e postigos, foi iniciada a fabricação por estereolitografia e pós-processamento (remoção das estruturas de suportes, limpeza e tratamento de pós-cura em forno de luz ultravioleta). Em seguida o vão traseiro do inserto foi preenchido com resina RenShape 4036 que apresenta boa resistência a compressão e condutibilidade térmica. Depois de aguardado o tempo de cura da resina de preenchimento, o inserto foi instalado no porta-moldes. Para facilitar o reposicionamento depois de cada ciclo, os postigos e inserto foram numerados, conforme mostra a figura 4-5.

O molde foi instalado na máquina injetora e iniciou-se a moldagem dos protótipos em PEBD. A simulação do processo de injeção executada previamente em ambiente CAE permitiu que a condição de regime fosse atingida de forma bastante rápida, razão pela qual o número necessário de protótipos de PEBD foi rapidamente atingido. Em seguida, iniciou-se a moldagem com PP que demandou o

aumento substancial de temperatura e pressão de injeção. Esta nova condição provocou o colapso de partes do inserto logo depois que a quantidade mínima foi obtidas com certa folga. A figura 4-6 apresenta foto de um protótipos resultado da moldagem em PP e a tabela 4-1 apresenta as principais condições de processamento utilizadas para os dois materiais processados. Dado o processo de moldagem por injeção como terminado, os protótipos foram encaminhados ao cliente que ficou responsável pelo teste funcional.

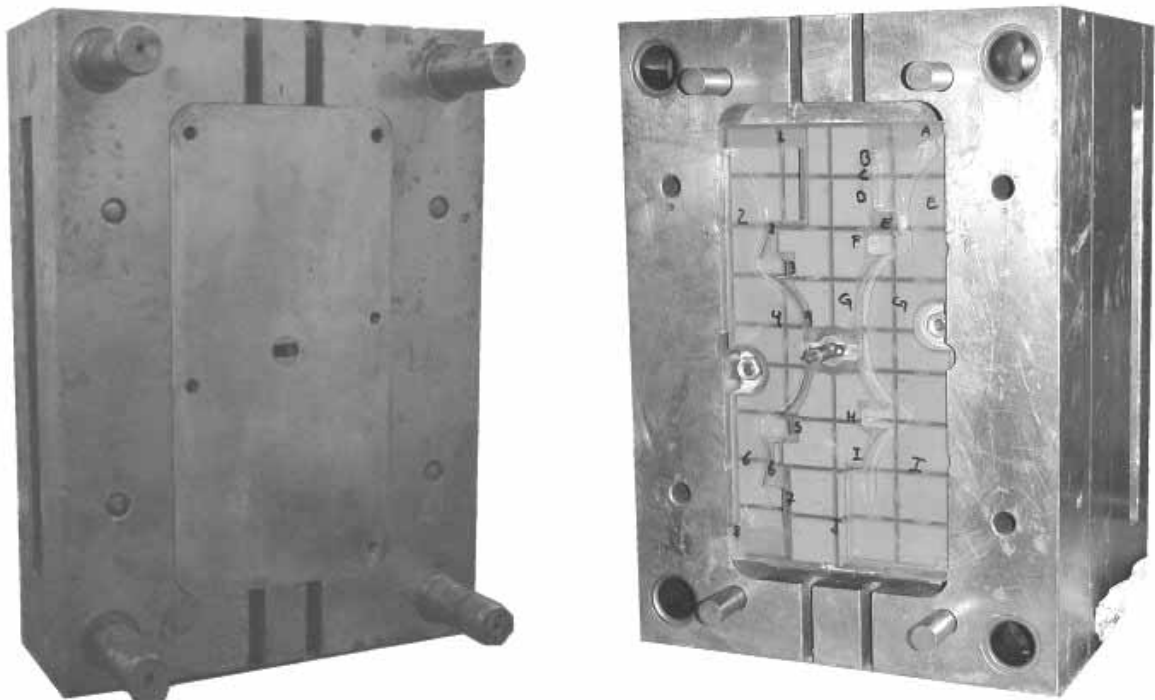


Figura 4-5: Foto dos insertos montados no porta-moldes

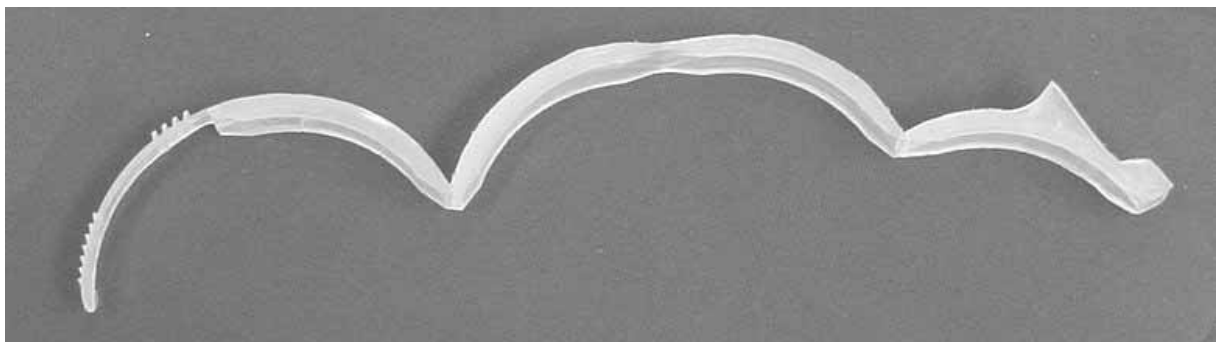


Figura 4-6: Protótipo resultante da moldagem nos moldes SL

Tabela 4-1: Condições de processamento para os termoplásticos utilizados

Material	Pressão de injeção [bar]	Velocidade de injeção [mm/s]	Pressão de recalque [bar]	Temperatura de injeção [°C]
PEBD	150	75	115	195
PP	300	100	230	220

Alguns dos protótipos que não foram enviados ao cliente foram analisados pela equipe de trabalho do Cimject. Cabe ressaltar que o conhecimento das funções do componente, do carregamento ao qual estaria submetido e das demais partes do sistema técnico era insuficiente para uma análise mais criteriosa. Entretanto, pela experiência da equipe, tinha-se noção que o projeto não estava otimizado. Ao realizar a dobra das peças, algumas delas automaticamente se romperam antes de completar o fechamento, pois não obedeciam às recomendações de projeto de peças de plástico.

Depois de alguns dias o cliente novamente entrou em contato, pois havia se decidido por uma nova concepção que mesclava as duas anteriores e pretendia realizar um novo teste funcional com protótipos produzidos em ferramental rápido para a nova solução. Desta vez, o cliente apresentou com maior detalhamento informações sobre o produto e mostrou com auxílio de protótipos os demais componentes do sistema técnico. Desta forma, as funções e o carregamento do laque ficaram compreendidas. Além disso, foi relatado que o projeto era de autoria de um terceiro (agência externa) que tratava de uma situação bastante comum no universo de produtos moldados por injeção. Examinando a nova solução observou-se que vários dos problemas levantados pela equipe de projeto do Cimject não foram percebidos pelo cliente e propôs-se à empresa, já que pouco influenciaria no custo do serviço, que ao realizar o segundo ferramental rápido, fosse incluída uma geometria desenvolvida pela equipe do Cimject.

Como pode ser observado na figura 4-7, o lacre tem como função fundamental proteger a união entre dois componentes “A” e “B” de uma conexão roscada. Na tentativa de desatarraxar o componente “B” o lacre imediatamente romper-se-ia evidenciando a violação do sistema.

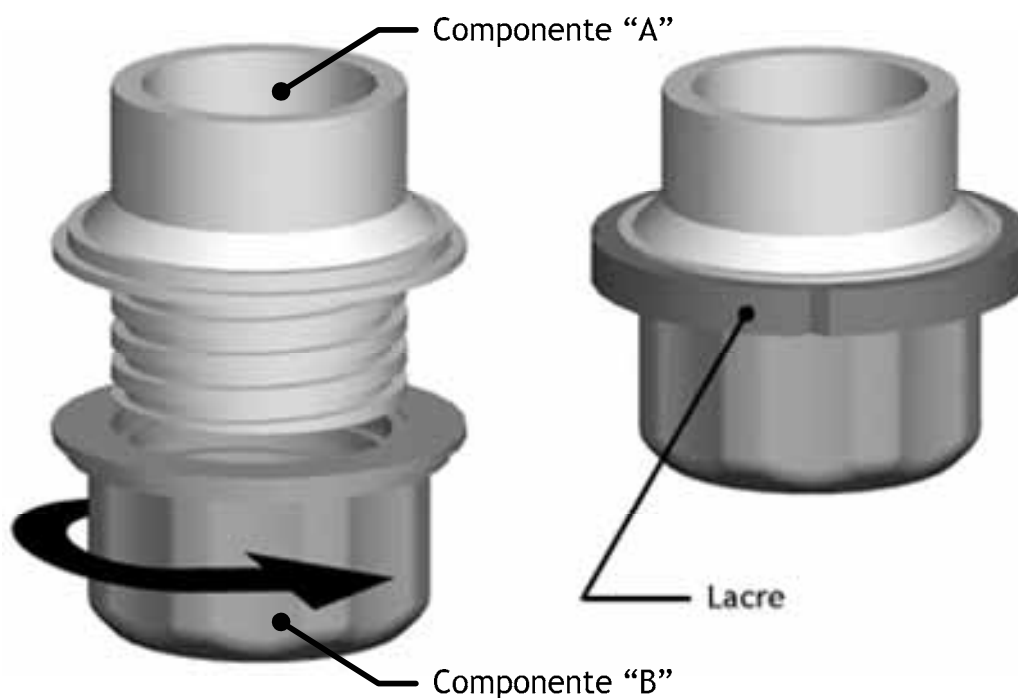


Figura 4-7: Ilustração esquemática do conjunto conexão e lacre

A alternativa de solução proposta pela equipe do Cimject incluiu novas ranhuras para facilitar o rompimento do lacre, um dimensionamento mais adequado para as dobras e melhorias que facilitaríamos o processo de moldagem por injeção, como a uniformização das espessuras de algumas regiões do lacre. A solução proposta também apresentava menor massa comparada a alternativa desenvolvida pelo cliente. Estas mudanças, porém, não descaracterizaram o projeto inicial.

O segundo inserto foi construído basicamente na mesma seqüência do primeiro, mas de uma forma muito mais facilitada. Desta vez, com o aprendizado obtido na realização do primeiro inserto, o projeto foi otimizado. Estas mudanças

foram percebidas durante o processo de moldagem por injeção. De maneira geral houve uma redução no tempo de desenvolvimento em dois dias úteis. Os protótipos foram fabricados apenas em PP e os parâmetros de injeção foram praticamente os mesmos utilizados no primeiro inserto. Os implementos proporcionaram um aumento considerável no número de peças obtidas.

4.1.2 Comentários relativos ao estudo de caso 1

Com a experiência do Cimject de pouco mais de 5 anos na área de prototipagem foi possível constatar que a maior parte das empresas sentem-se pouco à vontade ao expor seus produtos durante o seu desenvolvimento. Elas temem a divulgação de informações antes do lançamento do produto que no ambiente de acirrada competitividade é catastrófico. Durante o contato inicial, de forma geral, as empresas estão receosas e procuram certificar-se que o fornecedor apresenta confiabilidade. No caso particular do Cimject, esta incerteza se intensifica já que se trata de um laboratório inserido em um Campus Universitário. Frequentemente, os laboratórios universitários são prejudgados com relação a falta de comprometimento, cumprimento de prazos e, sobretudo, sigilo de informações, muitas vezes, pela influência de experiências mal sucedidas que algumas empresas vivenciaram ou tomaram conhecimento.

A falta de integração foi observada durante a execução deste estudo de caso onde algumas informações somente foram esclarecidas depois que a empresa adquiriu confiança. Se o problema fosse esclarecido antes da fabricação do primeiro inserto, possivelmente, não seria necessário fabricar o segundo. É sabido que desenvolvimento de parcerias sólidas e envolvimento antecipado com fornecedores fazem parte da implementação da engenharia simultânea, para tanto

é necessário o estabelecimento de relações de confiança. Além disso, observou-se que a forma como as partes se relacionam é um fator de grande importância para obter melhores resultados. Em contrapartida, o fornecedor de serviço deverá se especializar para interagir desta forma.

Abandonando as questões relacionadas à falta de integração a empresa trabalhava simultaneamente duas alternativas com grande nível de detalhamento. Como apresentavam poucas diferenças entre si, seria mais adequado escolher e concentrar os esforços em uma alternativa. Supõe-se que em virtude de prazos estreitos a empresa tenha terceirizado o projeto deste produto, isto pode ter favorecido a orientação insuficiente do projeto para a posterior manufatura.

Em relação aos protótipos, presume-se que tenham fornecido subsídios suficientes para as tomadas de decisão da empresa, já que o responsável da empresa salientou que permitiram a antecipação de problemas e melhoria da qualidade do seu produto, porém não soube precisar se houve redução no tempo de desenvolvimento. Poucos dados foram repassados pela empresa com respeito aos testes realizados nos protótipos.

De modo geral, o processo de fabricação rápida adotado foi adequado ao número de protótipos e prazo estipulado pela empresa. No segundo inserto foram implementadas algumas melhorias (aumento do ângulo de saída e inserção de vincos nos postigos) que facilitaram a extração das peças. As modificações incorporadas pela equipe do Cimject no lacre surtiram efeitos positivos, resultando no dobro de protótipos obtidos, comparando com a geometria anterior. Além disso, o re-projeto das regiões de dobra permitiu o melhor fechamento e pôs fim as quebras prematuras.

4.2 Estudo de caso 2

O estudo de caso 1 proveu poucas informações para a elaboração da sistemática em virtude da limitação de informações e de integração entre a empresa e o Cimject. Estas constatações motivaram a realização de um novo estudo de caso envolvendo o desenvolvimento de um produto por completo por uma equipe de projeto do Cimject em um processo de desenvolvimento integrado.

Escolheu-se como problema de projeto o desenvolvimento de um prendedor de roupas. A escolha do tipo de produto levou em consideração as limitações de prazo e recursos disponíveis para a realização deste estudo de caso. Uma restrição estabelecida foi que o prendedor deveria ser fabricado pelo processo de moldagem por injeção, sobretudo, pela delimitação do campo de estudo desta dissertação. Porém não é uma decisão infundada, pois o alto volume de produção deste tipo de produto condiz com as vantagens deste processo produtivo: como a variabilidade de formas, flexibilidade e incorporação de funções.

4.2.1 Projeto informacional do componente

▪ Estabelecimento das necessidades do produto

Sabe-se que o resultado fundamental do projeto informacional é o estabelecimento das necessidades dos consumidores. Neste estudo de caso foram utilizadas duas técnicas para defini-las. Na primeira, realizou-se um estudo com alguns prendedores existentes no mercado para um melhor entendimento do problema em questão. Neste estudo, foram fixados tecidos de diferentes materiais e espessuras em varais de arame e corda. Esta observação pôs em evidência as primeiras necessidades que o projeto deveria cumprir. A segunda técnica utilizada para a coleta de necessidades foi através de entrevistas informais com alguns

usuários freqüentes deste produto. A maioria das necessidades relatadas pelos usuários já havia sido listada durante o estudo inicial, o que reforça a idéia de que se deve ter um bom entendimento antes da resolução de um problema. Cabe ressaltar a importância do envolvimento de usuários, pois algumas necessidades fundamentais para o sucesso do produto somente foram descobertas através deles. Este é o caso da necessidade relatada na qual se sugere que as roupas não se desloquem ao longo do varal.

No passo seguinte, as exigências ou carências foram interpretadas e convertidas em termos de necessidades do produto. A equipe ainda hierarquizou e quantificou as necessidades conforme o grau de importância ou valor conferido pelos usuários. A partir das necessidades do produto foram determinados os requisitos de projeto, ou seja, uma forma de leitura compreensível e que define de forma precisa o que o produto deve fazer para atender as necessidades do produto [11].

- **Elaboração da matriz da casa da qualidade do produto**

Como, em princípio, os requisitos de projeto apresentam o mesmo grau de importância utilizou-se a matriz da casa da qualidade para obter a hierarquização dos requisitos de projeto a partir do relacionamento com as necessidades do projeto apresentada pela figura 4-8.

Necessidades do projeto	Requisitos de projeto														Importância				
	un.	-	-	-	-	mm	-	Pa	\$	n	n	N	-	s		s	g	-	-
	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	
O prendedor é durável/resistente	5	1	1	0	3	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	5
O prendedor não danifica as roupas	3	0	0	5	1	1	5	0	0	1	0	3	1	0	0	0	0	0	5
O prendedor é ajustável ao tipo de roupa e varal	1	0	0	3	5	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
O prendedor não deixa que as roupas desloquem	0	0	0	5	0	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
O prendedor não deixa as roupas caírem	1	0	0	0	1	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
O prendedor é de baixo preço	1	0	0	0	1	1	0	5	5	0	0	0	0	0	1	3	1	0	5
O prendedor não causa acidentes	3	1	1	0	0	0	0	1	0	3	1	0	5	0	0	0	0	0	5
O prendedor não causa desconforto no uso	0	0	0	0	1	0	0	0	0	5	5	0	1	1	3	0	0	0	5
O prendedor não suja as roupas	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5
O prendedor é fácil de usar	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	5	1	1	0	0	3	
O prendedor é leve	1	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	1	5	0	0	3	
O prendedor tem boa aparência	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	5	0	2	
O prendedor é ecologicamente correto	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0	1	0	0	0	0	5	1	
Valor da importância percentual	97	13	13	87	80	60	100	80	64	63	51	57	67	21	64	20	13		

Figura 4-8: Matriz da casa da qualidade do produto

4.2.2 Projeto conceitual

▪ Identificação das funções do produto

Prosseguindo-se com o processo de projeto, na fase de projeto conceitual realizou-se a identificação das funções do produto. Utilizou-se a técnica de decomposição funcional que procura identificar um problema principal, neste caso “prender roupas”, e, em seguida, dividi-lo em sub-problemas elementares. Um procedimento que contribuiu para a determinação das funções foi realizar simultaneamente um estudo do seqüenciamento das ações.

Foram relacionadas as seguintes funções:

- ♦ Função principal: Prender roupas
- ♦ Funções elementares: Promover pressão, facilitar entrada, gerar estabilidade, promover pega e causar conforto.

As funções elementares promover pressão, facilitar entrada e gerar estabilidade foram consideradas funções relacionadas com o desempenho técnico do produto, enquanto as funções promover pega e causar conforto foram relacionadas com a ergonomia do produto.

▪ Pesquisa de alternativas de soluções

Na busca de alternativas de solução para as funções relacionadas na fase anterior, a equipe de projeto inicialmente analisou produtos concorrentes existentes no mercado (figura 4-9) comparando-os conceitualmente. Dentre os produtos analisados, o que apresentava a alternativa de solução mais promissora para o problema, do ponto de vista econômico, foi o modelo “F”, já que, o produto reduziu-se a apenas um componente, incorporando a “mola” no próprio corpo de plástico. Entretanto, o conceito é eficiente para uma faixa de espessuras estreita (3 - 5 mm), acima disto, as roupas tendem a escapar ou são marcadas pelo prendedor, sobretudo quando utilizado em arames de diâmetros maiores que 4 mm.

Em seguida, foram consultadas algumas fontes de soluções a partir de princípios físicos [20] [61]. Por último, realizou-se um *brainstorming* com a presença dos integrantes da equipe de projeto.

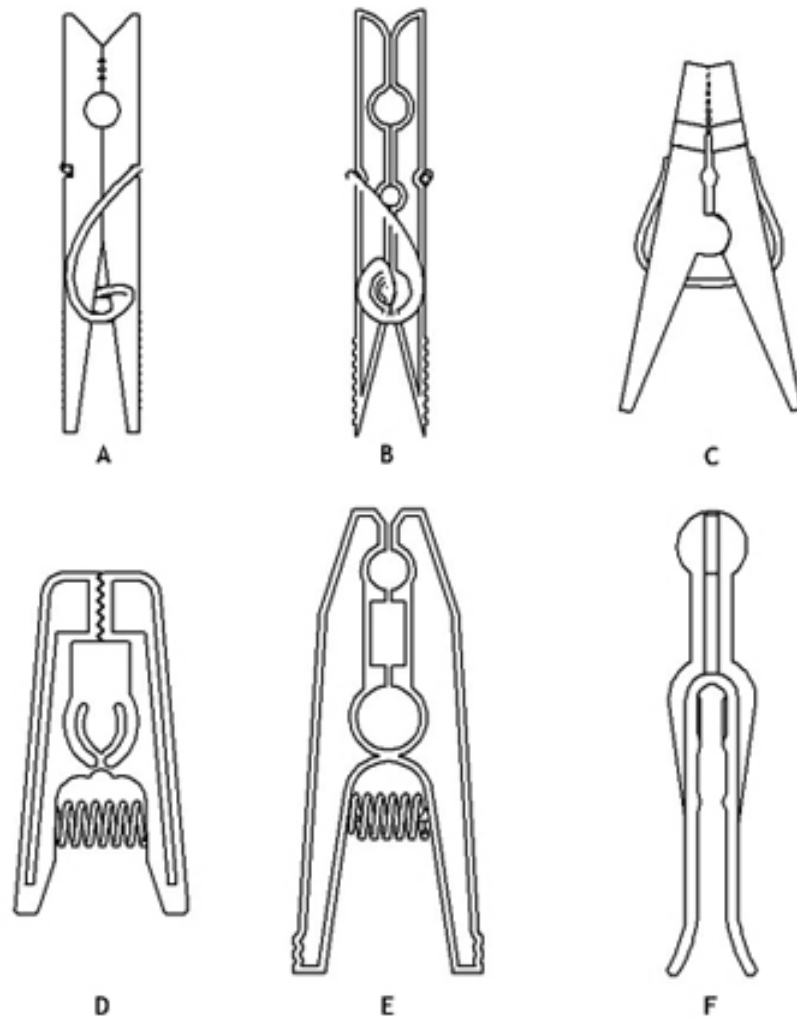


Figura 4-9: Exemplos de prendedores presentes no mercado

▪ Seleção da concepção do produto

Posteriormente, as soluções foram organizadas na forma de uma matriz morfológica textual, conforme a apresentada na tabela 4-2. Da matriz morfológica foram relacionadas algumas concepções do produto. A concepção que foi escolhida leva em conta simultaneamente o conjunto de soluções destacadas na tabela anterior, ou seja, as alternativas 1A + (2A e 2B) + (3A e 3D) + 4C + (5A e 5C). Em relação aos requisitos de projeto foi considerada pela equipe de projeto potencialmente mais promissora pelas questões econômicas, funcionais e de manufatura.

Tabela 4-2: Matriz morfológica textual

	Função	A	B	C	D	E
1	Promover pressão	Lei de Hooke	Torção	Efeito Poisson	Lei de Boyle-Mariotte	Leis I e II de Coulomb
2	Facilitar entrada	Entrada angulada	Entrada arredondada	Entrada lisa	Roletes	...
3	Gerar estabilidade	Superfície áspera	Ressaltos na superfície	Rebaixo na superfície	Aprisionar	...
4	Promover pega	Superfície áspera	Ressaltos na superfície	Rebaixo na superfície
5	Causar conforto	Arestas arredondadas	Materiais macios	Linhas suavizadas

O conceito adotado, esboçado na figura 4-10, lembra o utilizado no prendedor F, porém ele apresenta característica singular, a dupla “mola” representada pelos braços externo e internos. Esta característica torna o prendedor estável, uma vez que a roupa e arame, depois de passarem a região de entrada, são transportadas para o interior do prendedor onde permanecerão aprisionadas por efeito de uma força resultante. Em relação aos demais prendedores do mercado esta solução, do ponto de vista ergonômico, parece ser mais adequada, já que para executar a tarefa o usuário precisa empurrar e puxar o prendedor.

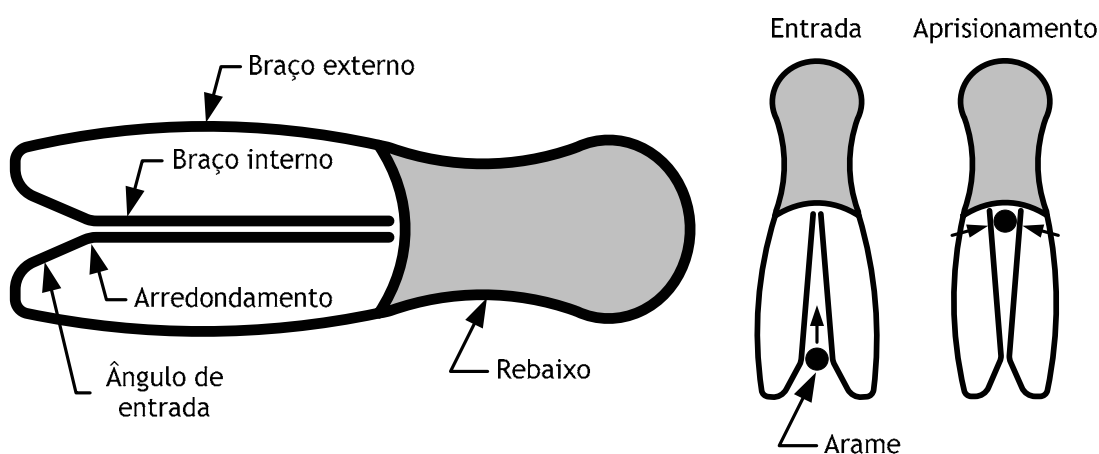


Figura 4-10: Esboço esquemático da solução adotada

4.2.3 Projeto preliminar

▪ **Elaboração da matriz da casa da qualidade do componente**

O conceito do prendedor escolhido na fase de projeto conceitual implicou no projeto de um único componente. Desta forma, a matriz proposta na fase de projeto informacional mostrou ser muito genérica. Então, optou-se por criar uma nova matriz mais específica (figura 4-11) estabelecendo os requisitos do componente a partir dos requisitos do produto.

Requisitos do produto	Requisitos do componente																Importância
	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	
Resistência mecânica	5	5	3	3	1	3	1	5	0	5	3	0	0	0	0	1	5
Resistência térmica	0	0	1	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	1
Resistência química	0	0	1	0	5	5	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
Desgaste/marcas na roupa	3	0	1	0	0	1	5	3	0	1	3	1	1	1	0	0	5
Amplitude de abertura	5	0	5	0	0	1	0	5	0	5	3	0	0	0	0	0	5
Sujeição tangencial	3	0	1	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	5
Pressão de contato	5	0	1	0	0	1	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	5
Custo de aquisição	0	3	3	1	1	1	1	1	0	5	0	0	1	0	0	1	5
Quantidade de componentes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Cantos vivos	0	0	5	0	0	0	1	0	0	0	5	1	0	0	5	0	5
Força de abertura	5	0	0	0	0	1	5	5	0	0	3	0	0	0	0	0	3
Proliferação de contaminantes	0	0	0	0	1	1	1	0	0	3	1	5	0	0	3	0	3
Identificação do funcionamento	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	5	5	0	0	5
Tempo de instalação	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	1	0	5	5	0	0	3
Massa	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	5
Aparência agradável	0	0	0	0	0	5	1	1	0	1	3	5	1	0	5	5	3
Reciclagem	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	5	0	0	1	1
Valor da importância percentual	100	32	82	20	14	49	56	93	44	83	75	34	46	36	39	16	19

Figura 4-11: Matriz da casa da qualidade do componente

A matriz da casa da qualidade do componente, proporcionou o estabelecimento dos requisitos mais importantes para o desenvolvimento do componente que em ordem crescente foram: índice de desempenho de mola, amplitude de abertura, custo do material, resistência à fadiga mecânica e cantos vivos.

▪ Seleção do material

O processo de seleção do material foi realizado em duas etapas. Inicialmente, utilizou-se o método de Ashby [61] para a rápida eliminação de classes não adequadas. Este método permitiu uma seleção criteriosa, já que leva em consideração a futura aplicação na seleção do material. Segundo o referido método, os materiais próprios para mola apresentam elevados valores para os índices M_1 e M_2 das equações 4.1 e 4.2:

$$M_1 = \frac{\sigma_f^2}{E} \quad (4.1)$$

$$M_2 = \frac{\sigma_f^2}{\rho \cdot E} \quad (4.2)$$

O procedimento de escolha foi realizado em função do critério de mínima massa (M_2) visando minimizar o custo do produto. Materiais que na carta representada na figura 4-12 se encontram esmaecidas, apresentam $M_2 \leq 2$ kJ/kg, desta forma, foram antecipadamente descartados devido ao baixo desempenho de mola [61]. Para uma melhor observação a região onde se encontram os materiais termoplásticos foi ampliada. Desta seleção inicial foram pré-selecionadas as classes PEBD, PP, PMMA, PA e PET.

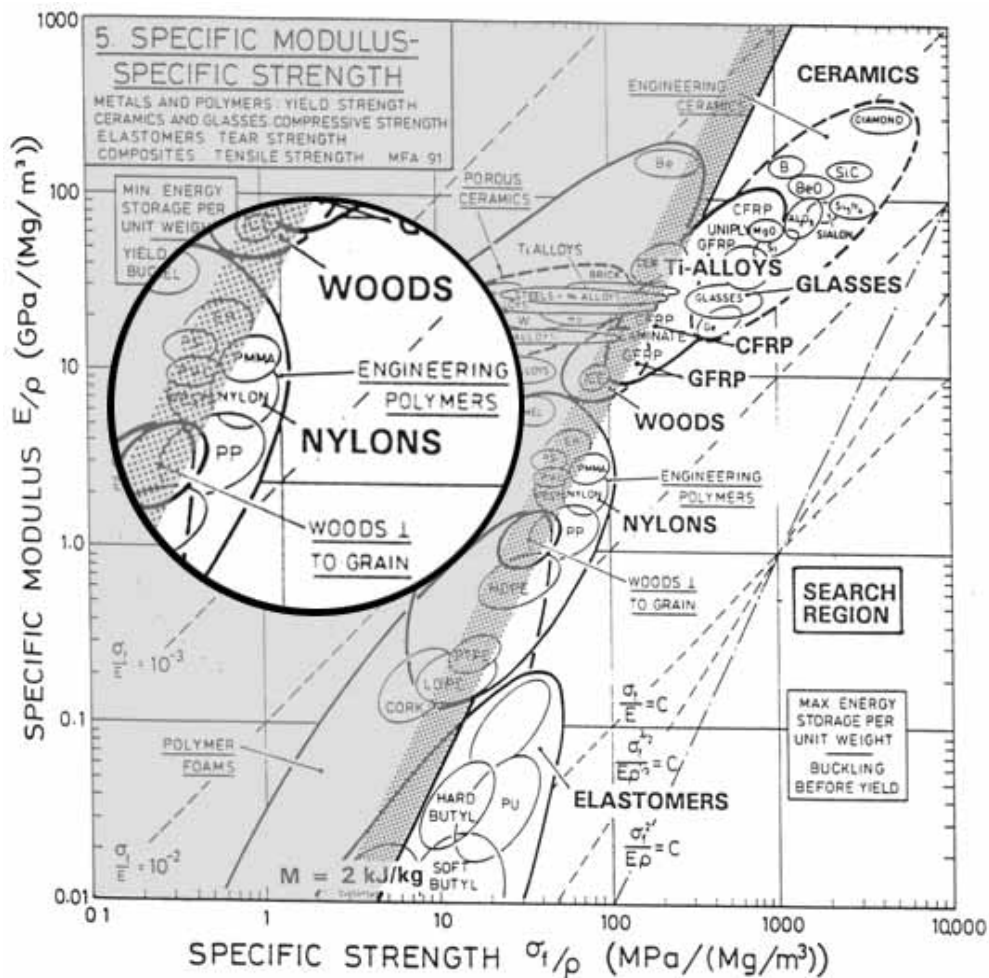


Figura 4-12: Carta de seleção de materiais para molas pelo critério da mínima massa. Adaptada de Ashby [61]

Apesar de apresentarem propriedades mecânicas um pouco superiores, foram descartados os polímeros baseados nas classes PMMA, PA e PET devido ao elevado custo do material que foi apontado como um dos principais requisitos do componente. Dentre as classes remanescentes a escolhida foi PP por apresentar menor custo e, principalmente, melhores propriedades mecânicas e moldabilidade superior comparado com o PEBD.

Dentro da classe dos polipropilenos o material escolhido foi o H-301 fornecido pela Braskem que apresenta propriedades mecânicas necessárias, custo acessível e disponibilidade em estoque. As principais propriedades mecânicas deste termoplástico encontram-se listadas na tabela 4-3.

Tabela 4-3: Principais propriedades do polipropileno H-301 (extraído de Braskem [62])

Classe	Fabricante	Nome comercial	σ_r (MPa)	E_f (GPa)	ρ (g/cm ³)
PP	Braskem	H 301	34	1,42	0,905

▪ Estudo preliminar da forma e ergonomia

Simultaneamente à seleção do material realizou-se um estudo preliminar da forma e ergonomia do produto com base no esboço conceitual da figura 4-10, sendo concebidos, por meio de modelagem manual, protótipos focados confeccionados em espuma poliuretana expandida. A modelagem em espuma foi escolhida em razão do curto prazo, baixo custo e disponibilidade do processo nas instalações do laboratório onde o estudo foi realizado. Além disso, a modelagem em espuma poliuretana continua a ser um dos processos favoritos para esta finalidade [35]. Foram avaliadas quatro configurações, sendo escolhida a opção “D” por ter obtido melhor desempenho do ponto de vista estético. A figura 4-13 ilustra as quatro formas que foram produzidas para avaliação. Como resultado deste estudo obteve-se a primeira aproximação física do produto.

A modelagem em espuma foi utilizada para um segundo propósito, a avaliação ergonômica preliminar. As referências especializadas consultadas ([36], [63] e [64]) apenas apresentaram informações relativas ao tipo de pega e não apresentaram dados relacionadas às dimensões de pega adequadas. Desta forma, o protótipo em espuma escolhido no estudo da forma foi avaliado quanto ao cumprimento das duas funções relacionadas à ergonomia, promover pega e causar conforto. A equipe de projeto manuseou o protótipo e procurou simular os movimentos esperados para o processo de fixação de uma roupa em varal,

conforme ilustra a figura 4-14. O desempenho foi considerado aceitável e a equipe aprovou a geometria para a elaboração do modelo 3D CAD.

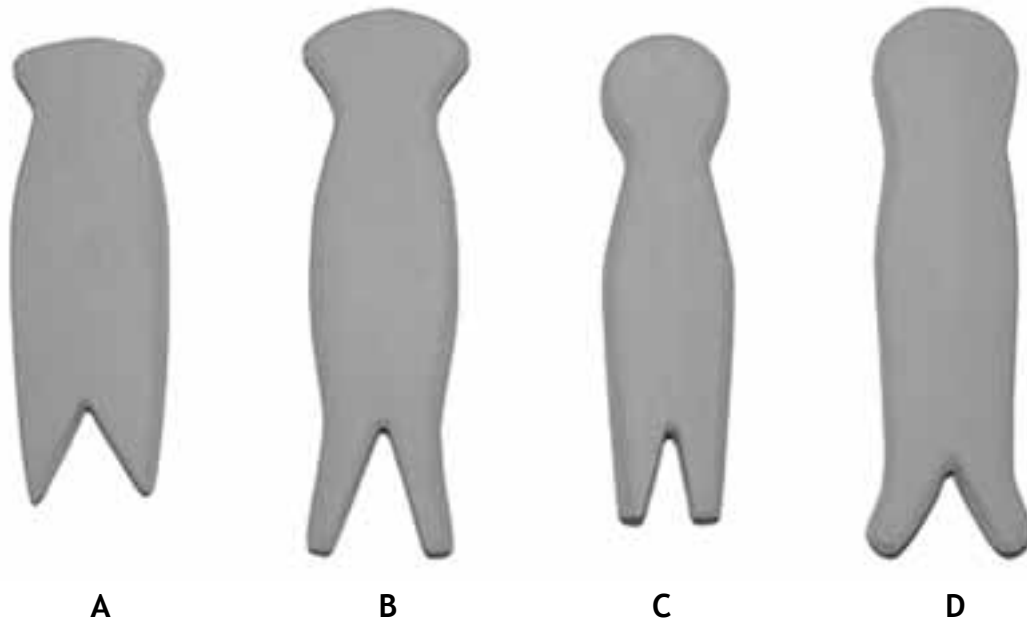


Figura 4-13: Modelos em espuma



Figura 4-14: Avaliação ergonômica preliminar

▪ Simulações em sistemas CAE

Com base na geometria selecionada na tarefa anterior, realizou-se a modelagem 3D CAD da geometria do produto para ser utilizada nas simulações em sistemas CAE (figura 4-15). Inicialmente, os braços externo e interno do produto

que inicialmente foram dimensionados com 3 e 2,5 mm na espessura, respectivamente, e 10 mm na largura. A geometria modelada apresentava algumas simplificações (ausência de arredondamentos) que agilizaram a execução das análises e diminuíram os problemas de convergência, com pequeno comprometimento em relação à precisão dos resultados. Finalizada a modelagem em CAD, a geometria simplificada foi traduzida para formatos de leitura IGS e STL dos softwares Ansys 5.7 e Moldflow MPI 4.0, respectivamente.

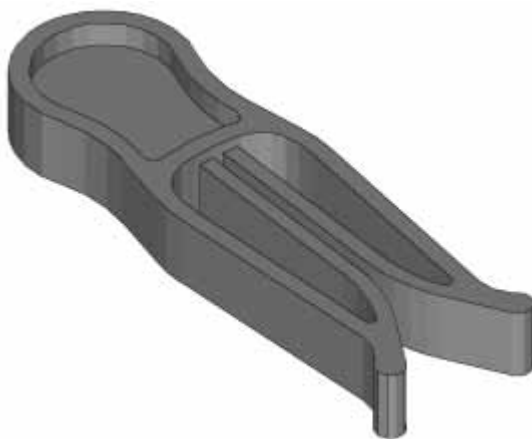


Figura 4-15: Modelo 3D CAD simplificado

Primeiramente, conduziu-se os esforços para a configuração estrutural do produto. Com base nas recomendações de MASCARENHAS [14] adotou-se o valor de 1,4 como coeficiente de segurança para componentes moldados por injeção e Von Mises como critério de falha do componente. As condições de contorno utilizadas se consistiram de deslocamentos prescritos de 4 e 10mm nas regiões de entrada e aprisionamento que foram consideradas críticas pela equipe de projeto. Para cada situação foram analisados nos pontos de concentração de tensões: a magnitude e o estado de tensões. A figura 4-16 apresenta o resultado de uma simulação de deslocamento de toda a região interna. De maneira geral o produto apresentou um desempenho favorável no que se refere a grandes deslocamentos, porém, salientou a dificuldade para deslocamentos inferiores a 3 mm que resulta em força

insuficiente para aprisionar as roupas no arame. Desta forma as espessuras foram aumentadas em 0,5 mm na espessura como forma de melhorar o desempenho em pequenos deslocamentos.

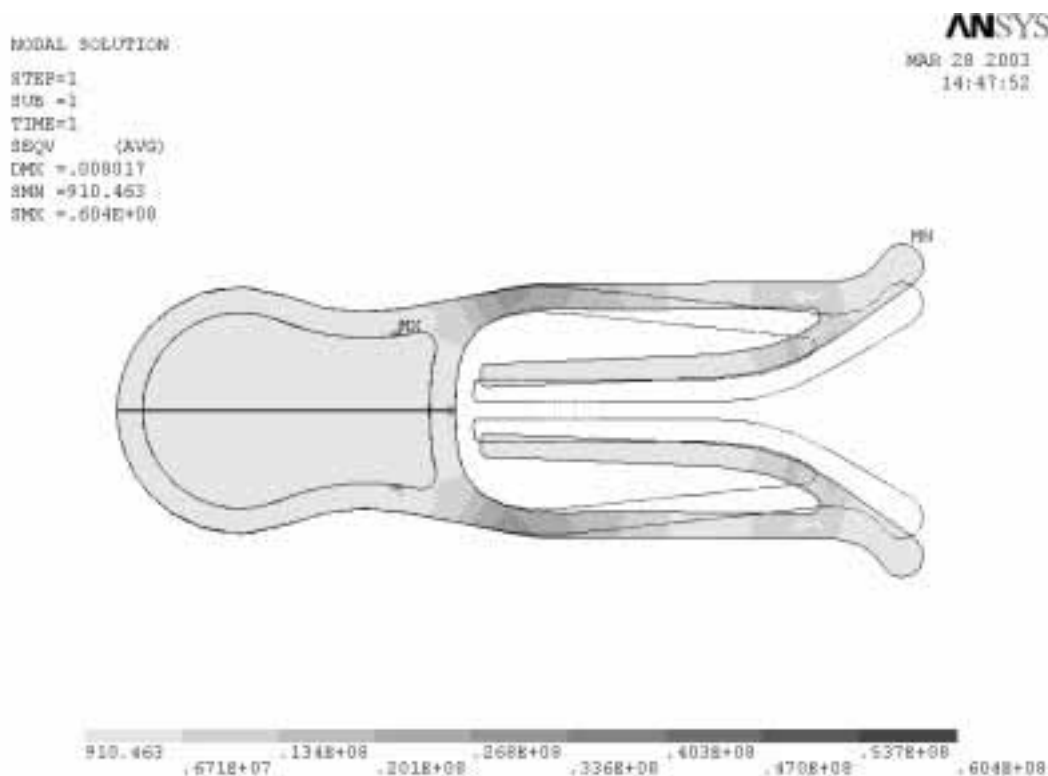


Figura 4-16: Simulação de deslocamento em sistema CAE

A avaliação do processo de fabricação foi iniciada logo em seguida com auxílio de um software específico para o processo de moldagem por injeção. Nesta simulação, a partir da determinação do ponto de injeção, constatou-se a inexistência de linhas de solda frias nas regiões de concentração de tensão e duas pequenas regiões com aprisionamento de ar. Obteve-se também uma estimativa dos principais parâmetros de processamento: pressões de injeção e recalque, velocidade de injeção, força de fechamento e tempo resfriamento. A figura 4-17 ilustra a simulação do processo de fabricação apresentando o resultado do tempo de injeção.

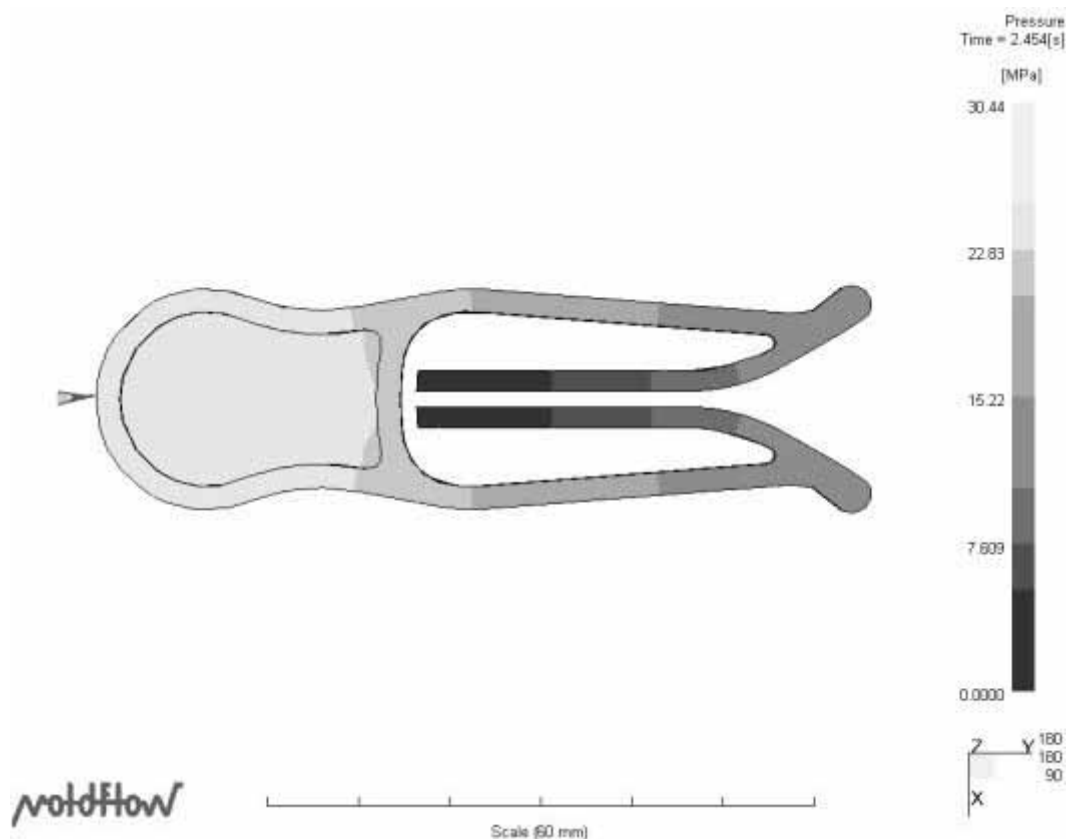


Figura 4-17: Simulação da pressão de injeção em sistema CAE

Em face dos resultados das simulações em sistemas CAE elaborou-se o modelo CAD final do produto. Nele foram introduzidas características que haviam sido descartadas na elaboração do modelo simplificado, como os arredondamentos das arestas, os ângulos de saída e as inscrições de texto. A figura 4-18 apresenta em perspectiva o modelo resultado da primeira iteração de projeto.



Figura 4-18: Modelo CAD de primeira iteração de projeto

▪ Avaliação da solução de projeto

A equipe de projeto julgou necessário avaliar funcionalmente o produto resultante da primeira iteração completa de projeto, pois existia uma certa indecisão, sobretudo sobre o funcionamento técnico do produto. As questões relacionadas à estética e ergonomia não demandariam este nível de avaliação, pois, de certa forma, foram avaliadas com os modelos em espuma e com os recursos de visualização disponibilizados do software CAD 3D. Embora as ferramentas de projeto utilizadas tenham fornecido um indicativo do desempenho, ficou difícil de idealizar como se comportaria o produto com a entrada das roupas e se as mesmas permaneceriam presas dentro do prendedor. Estas dúvidas não poderiam ser respondidas depois de investido tempo e dinheiro em um molde.

Diante desta situação considerou-se que a elaboração de um protótipo rápido poderia facilmente ajudar na resolução dessas dúvidas. A escolha do processo baseou-se na disponibilidade do processo de estereolitografia. Apesar da resina SL disponível, DSM Somos 7110, apresentar comportamento diferente do material termoplástico escolhido PP H-301, a equipe considerou que esta diferença não representaria disparidade que inviabilizasse a avaliação dos principais requisitos do produto pressão de fechamento e amplitude de abertura. A tabela 4-4 apresenta as principais propriedades dos dois materiais supracitados.

Tabela 4-4: Comparação entre as principais propriedades do PP H-301 e SI 7110 (extraídos de Braskem [62] e DSM Somos [65])

Classe	Fabricante	Nome comercial	σ_r (MPa)	E_f (GPa)	ρ (g/cm ³)
PP	Braskem	H 301	34	1,42	0,905
Epóxi	DSM Somos (SL)	7110	44	1,71	1,130

De posse dos protótipos rápidos foram propostos testes no sentido de avaliar o funcionamento e a usabilidade do produto. Conforme representado na figura 4-19, foi produzido um aparato similar ao normalmente utilizado para estender roupas.

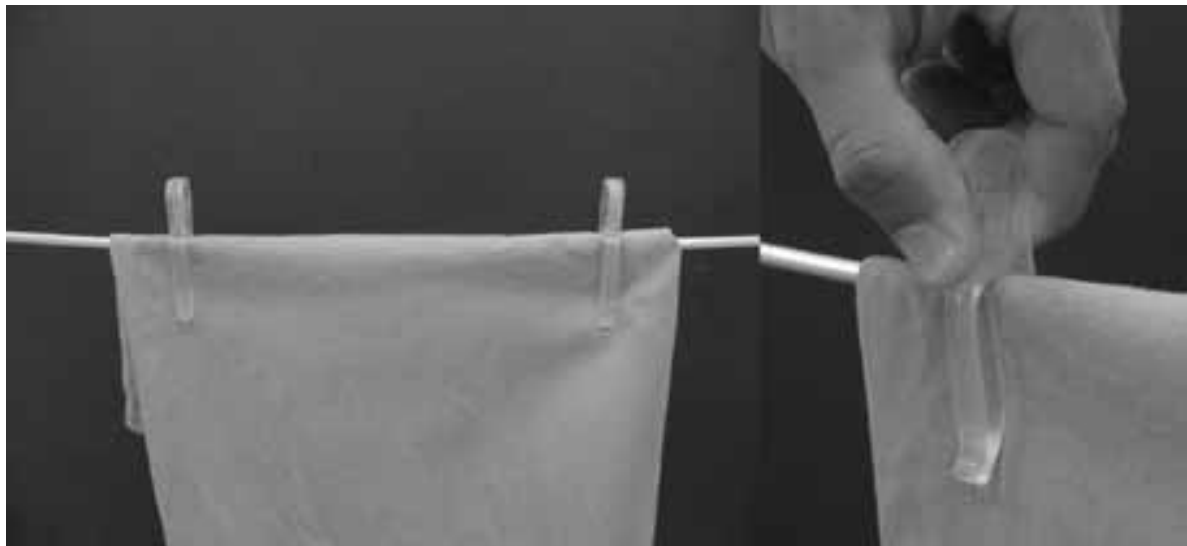


Figura 4-19: Teste do produto com auxílio de protótipos rápidos

O modelo de referência [2] não apresenta uma descrição detalhada de como deveriam ser conduzidos os testes. Diante disto, os testes foram divididos em três categorias: estética, ergonômica e técnica. Preferiu-se começar pelos testes estéticos e ergonômicos, pois os protótipos poderiam ser danificados quando submetidos aos técnicos. Na lista a seguir é apresentada uma síntese das três avaliações conduzidas, contemplado os objetivos específicos de cada teste e os resultados obtidos.

- ♦ **Avaliação estética**

Objetivos: Analisar características visuais, forma, curvatura, desenho e qualidades semânticas.

Resultados: O protótipo apresentou uma aparência agradável e proporção equilibrada, não ocasionando reações no sentido oposto pela

equipe de projeto e outros integrantes do Cimject. Pequenas modificações foram propostas como forma de melhoria, como o aumento do raio na área de transição na região de entrada e nas arestas que o circundam.

♦ **Avaliação ergonômica**

Objetivos: Analisar conforto e usabilidade (manuseio).

Resultados: Notou-se um pequeno desconforto devido aos pequenos raios de arredondamento existentes (0,5mm). A região de pega apresentava largura adequada, entretanto, a espessura poderia ser aumentada para melhorar a empunhadura. O protótipo apresentou facilidade no manuseio, além de requerer pouco esforço para desempenhar a tarefa, de tal modo que o usuário desenvolve movimentos simples para aproximar, instalar e retirar o prendedor. A rápida identificação da forma de uso foi considerada um ponto positivo.

♦ **Avaliação técnica**

Objetivos: Avaliar a pressão de contato e ângulo de entrada adequado variando a espessura dos tecidos.

Resultados: O protótipo funcionou conforme o esperado para o produto. Depois de ultrapassada a região de entrada, as roupas são direcionadas para dentro do prendedor, assumindo uma situação estável. Nos testes realizados em arame de 4mm de diâmetro o protótipo apresentou um bom desempenho. Entretanto, em varais de corda este desempenho foi apenas satisfatório, pois a pressão conferida não foi suficientemente grande para fixar roupas de malha fina, como a seda. Cabe ressaltar que

o protótipo apresentou uma deformação (proveniente de contração do processo de pós-processamento, após a etapa de fabricação do protótipo no equipamento de prototipagem rápida) que influenciou negativamente os resultados. A melhoria adotada pela equipe de projeto foi a de diminuir o comprimento dos braços para aumentar a pressão de contato.

Na seqüência realizou-se a remodelagem do prendedor em CAD 3D onde foram incluídas as melhorias propostas a partir da realização da tarefa de avaliação, tendo como resultado, a geometria apresentada na figura 4-20.

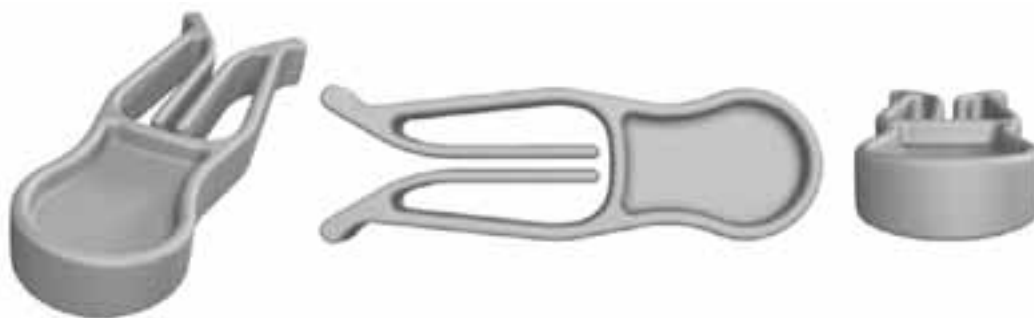


Figura 4-20: Modelo CAD modificado após a avaliação com protótipos rápidos

A avaliação de requisitos como a resistência ao impacto, à fadiga mecânica, a degradação por luz ultravioleta e solventes, somente faz sentido em poder de um protótipo utilizando material e processo de fabricação do produto final. Neste caso seria necessário a fabricação de um molde para avaliar o conjunto de requisitos do componente que não puderam ser testados com o protótipo anterior, entretanto, esta etapa foi considerada desnecessária para efeito dos objetivos iniciais propostos para o desenvolvimento deste estudo de caso.

4.2.4 Comentários relativos ao estudo de caso 2

De modo geral, os modelos de referência utilizados contribuíram para o bom desenvolvimento deste projeto. As atividades apresentam uma seqüência lógica e

coerente. De fato, algumas atividades do modelo de Daré [2], precisariam de um maior detalhamento como é o caso das atividades relacionadas com a fabricação do protótipo para posterior avaliação das soluções empregadas. Apesar de comentar a importância das funções estéticas e ergonômicas o autor estruturou e concentrou o seu modelo de referência às funções técnicas. Os ciclos de estudo da estética e ergonomia, necessários no desenvolvimento do produto deste estudo de caso, foram desconsiderados na elaboração do modelo de referência seguido.

Os diferentes tipos de protótipos utilizados no decorrer deste projeto, ilustrados na figura 4-21, foram muito importantes para o aprimoramento da solução conceitual. No início da fase de projeto preliminar, cogitou-se utilizar protótipos rápidos, porém devido à indisponibilidade de uma tecnologia de caráter conceitual preferiu-se utilizar a modelagem em espuma poliuretana. O processo disponível (SL) não mostrou ser uma solução eficaz nesta primeira iteração. Como depende da criação de um modelo 3D CAD, que neste caso não estava disponível, o tempo necessário para a fabricação e avaliação seria muito maior, comparado ao uso de modelagem em espuma. O uso de protótipos do tipo focado, modelados em espuma, se mostrou uma opção viável na materialização do conceito e determinação da forma básica do produto. Conforme já mencionado por outros autores [35] [66], o envolvimento do projetista na construção manual do protótipo facilitou o entendimento e a criação do modelo CAD.

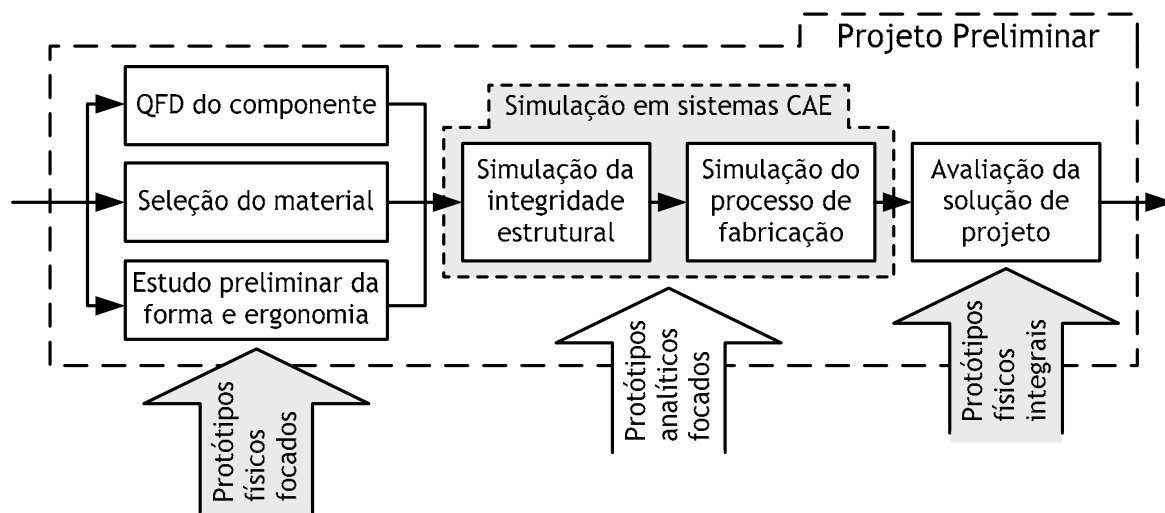


Figura 4-21: Uso de diferentes protótipos na fase de projeto preliminar

O uso dos protótipos integrais, fabricado pelo processo de estereolitografia, não possibilitou uma avaliação “completa” do projeto, pois o material e o processo de fabricação do protótipo diferem dos que foram selecionados para o produto. Contudo, pode-se ter uma idéia melhor sob os aspectos estéticos, ergonômicos e técnicos e esta análise antecipou problemas que seriam detectados somente depois da fabricação do molde. Além disso, foram detectados problemas difíceis de serem analisados na forma de esquemas conceituais, principalmente aqueles que dependem das relações físicas do produto como, por exemplo, se as superfícies seriam suficientes para promover o atrito necessário para fixação das roupas. Certamente este problema poderia ser estudado analiticamente, entretanto seus altos tempos de modelagem e processamento poderiam suplantar os benefícios no produto. Por outro lado, através do uso de protótipos físicos e fabricados rapidamente com o processo de estereolitografia (1 dia útil), foi possível verificar rapidamente a funcionalidade do produto sob este aspecto e obter segurança suficiente para dar prosseguimento ao desenvolvimento do produto.

Cabe destacar que o protótipo integral utilizado nos testes estava deformado em decorrência de descuidos no processo de pós-processamento. Isto ressalta a

importância de indicar cotas de controle junto ao pedido de protótipo e realizar inspeção dimensional no recebimento do mesmo.

O processo de avaliação poderia ser conduzido de maneira mais formal, com o preenchimento de um relatório de acompanhamento que poderia ser arquivado e utilizado futuramente em desenvolvimentos similares.

Outra classe utilizada no desenvolvimento foram os protótipos analíticos focados. A versatilidade, qualidade principal, favoreceu na rapidez das iterações de projeto durante a realização das análises dos resultados das simulações em CAE. Os recursos gráficos do software CAD possibilitaram uma avaliação prévia do comportamento estético do produto.

Neste estudo de caso, as análises com protótipos físicos integrais complementaram as simulações em CAE realizadas com protótipos virtuais. O uso destas ferramentas agilizou o desenvolvimento do produto e favoreceu a antecipação rápida de problemas na fase onde os custos de mudanças são relativamente baixos. Além disso, poderiam ser utilizados para outras finalidades como o planejamento da fabricação do molde, estudos de acondicionamento, aplicações mercadológicas, treinamento, entre outras. Finalmente, apesar do problema de projeto ter sido relativamente simples, o objetivo proposto para este estudo de caso foi atingido.

4.3 Diretrizes para a elaboração da sistemática

A realização dos estudos de caso, muito mais o segundo que propriamente o primeiro, contribuiu com diretrizes para a elaboração da proposta de sistemática que será apresentada no próximo capítulo.

Um item importante que de alguma forma deverá ser contemplado pela sistemática é a contratação do serviço, mesmo que seja realizado internamente. O uso de um documento claro e objetivo, contemplando requisitos essenciais do protótipo pode reduzir o risco do recebimento de um protótipo inadequado. Além disso, a elaboração deste documento por parte da equipe de projeto ajudará na escolha do processo de fabricação do protótipo. Apesar do caráter burocrático, estes documentos podem ser incorporados ao histórico do produto. Informações referentes à realização do teste e aos resultados obtidos devem ser armazenadas para uso futuro. Sentiu-se a falta deste tipo de informação no desenvolvimento do estudo de caso 2.

Observou-se que a tarefa de avaliar um produto por meio de protótipos físicos é fundamental para que as metas planejadas sejam alcançadas, porém muitas vezes dispensável. Por mais que as simulações em sistemas CAE sejam utilizadas e a constante incorporação de recursos nos sistemas CAD, sempre restarão dúvidas que podem ser esclarecidas com um protótipo físico. Porém, a resolução destas dúvidas pode consumir uma quantidade considerável de recursos. Diante disto, a sistemática deverá apresentar uma ferramenta que possa ser utilizada para analisar a viabilidade do teste.

A proposta deverá conter uma etapa referente ao planejamento, pois ao final do estudo de caso 2 notou-se que o aproveitamento do teste seria melhor utilizando um método de planejamento estabelecendo o protocolo de teste e o método de avaliação dos resultados.

CAPÍTULO 5 - SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES DE PROJETO

Baseado em informações coletadas na revisão bibliográfica, algumas das quais apresentadas nos capítulos 2 e 3, e nos estudos de caso realizados no capítulo 4, o presente capítulo descreve uma proposta de sistemática para ser seguida durante o projeto preliminar, para orientar a equipe de projeto em relação ao uso de protótipos físicos na avaliação de soluções de projeto de componentes moldados por injeção.

Conforme mencionado anteriormente, esta sistemática procura detalhar algumas tarefas propostas no modelo de referência de Daré [2], especificamente as relacionadas com a confecção do protótipo do componente e testes funcionais (figura 5-1). Acredita-se que o maior detalhamento destas atividades proporcionará uma condição mais favorável para que a equipe de projeto avalie um componente moldado por injeção por meio da confecção e teste auxiliado por protótipos.

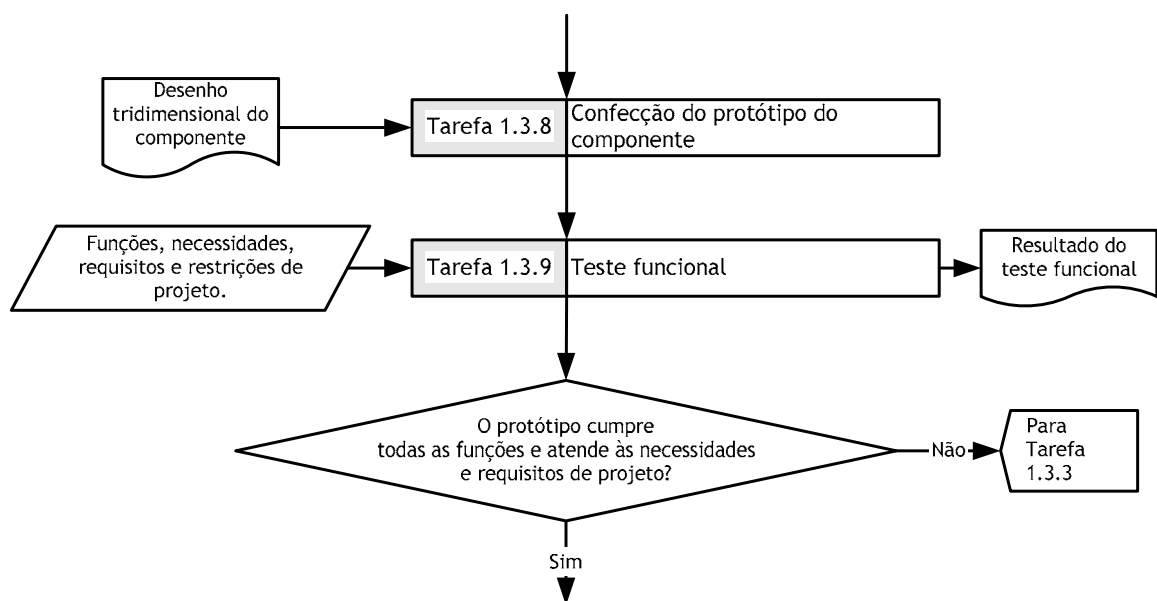


Figura 5-1: Parcela do modelo de referência que estará contida na sistemática (adaptado de Daré [2])

5.1 Estrutura da proposta

A proposta de sistemática está constituída em cinco sub-tarefas:

1. Identificação dos testes e determinação dos parâmetros de avaliação;
2. Planejamento do teste;
3. Confeccção do protótipo do componente;
4. Execução do teste;
5. Preparação e análise dos resultados e deliberações para o projeto.

O conjunto de sub-tarefas compõe uma única tarefa denominada de **Avaliação de Soluções de Projeto Auxiliada por Protótipos Físicos** que coliga as tarefas Confeccção do Protótipo do Componente e Testes Funcionais abordados no modelo de Daré. Acredita-se que este novo arranjo contribua para uma melhor aplicação da sistemática, pois inclui as sub-etapas 1 e 2 que foram apontadas nos estudos de caso como importantes.

Cada uma das sub-etapas será desdobrada em um conjunto de atividades seqüenciais e necessárias. Além das devidas, ações estão inclusas na sistemática as entradas e saídas relevantes para o processo. A figura 5-2 apresenta o significado da simbologia adotada na sistemática.

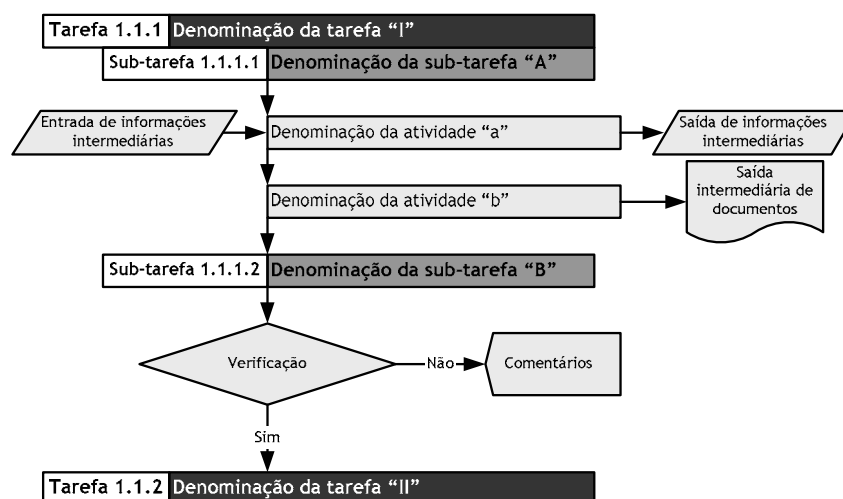


Figura 5-2: Significado dos símbolos adotados nos fluxogramas que ilustram a proposta

Cabe ressaltar que a sistemática está fundamentada no princípio de que o desenvolvimento esteja sendo realizado com base no modelo de referência, ou seja, pressupõe-se que as possíveis entradas que foram geradas em fases anteriores do projeto informacional e conceitual do componente e de parte do projeto preliminar, estarão disponíveis. Após a apresentação da sistemática serão discutidas alternativas para o caso de utilizar-se outras metodologias para o processo de projeto.

5.2 Identificação dos testes e determinação dos parâmetros de avaliação

Esta primeira sub-tarefa que está ilustrada esquematicamente na figura 5-1, tem como principal finalidade a identificação dos testes que serão realizados e a determinação dos parâmetros que serão avaliados no teste.

Inicialmente, a equipe de projeto deverá verificar a existência de históricos de desenvolvimentos similares na forma de documentos, experiências, resultados de testes anteriores, árvore de falhas, impressões de campo (condições de trabalho) e índice de reclamações dos usuários, serão de grande valia em todo o processo de avaliação de soluções de projeto.

Em seguida propõe-se que sejam identificados os tipos de testes que serão realizados. No capítulo 2 discutiu-se acerca dos testes que podem ser realizados durante as etapas de projeto de produtos. No caso particular da etapa de projeto preliminar, podem ser avaliados por meio de teste, aspectos estéticos, ergonômicos e técnicos do produto. Para cada um destes aspectos, existe uma série de possíveis testes que devem ser identificados neste momento.

Conforme já foi mencionado anteriormente, os testes são procedimentos realizados na busca de respostas para dúvidas. Muitas vezes o que será testado é

fácil de ser identificado, como por exemplo, fruto de normas ou legislação, alguns produtos, como medicamentos, alimentos e eletrodomésticos, são submetidos a alguns testes antes de serem liberados para o mercado consumidor. Lida [36] destaca que os produtos industriais normalmente passam por testes de controle de qualidade que visam a verificação de certas variáveis definidas no processo de projeto, como o nível de ruído e o consumo de energia. Nestes casos não existe dificuldade quanto a identificação do teste e a determinação dos parâmetros que serão testados.

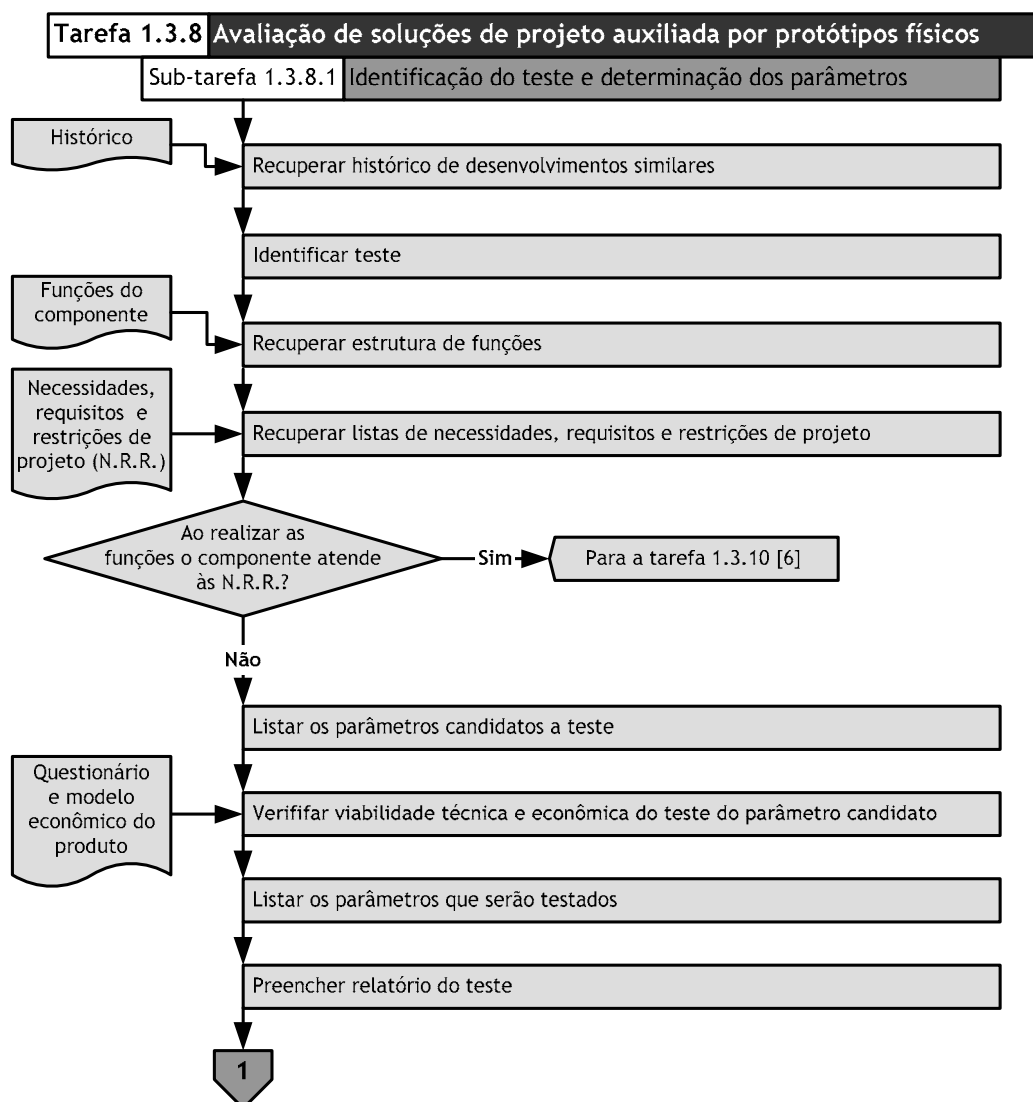


Figura 5-3: Fluxograma da sub-tarefa determinação dos parâmetros de teste

A determinação dos parâmetros de teste durante o processo de projeto poderá não ser tão trivial, em alguns casos estes parâmetros podem estar encobertos. Se estes parâmetros duvidosos são importantes para o desempenho do produto, não sendo identificados durante o processo de projeto, poderão não ser percebidos pelo controle de qualidade na fase de fabricação. Muitas vezes o envolvimento da equipe de projeto na resolução de um problema específico, favorece que algumas deficiências passem despercebidas. Se passarem, fatalmente seus efeitos serão manifestados na fase de uso do produto. O tamanho do prejuízo será proporcional ao quanto este parâmetro é importante para o desempenho do produto, como por exemplo, a quebra da carcaça de um telefone ao sofrer uma queda casual.

Uma “investigação inversa” é sugerida para auxiliar a revelar estes parâmetros. Neste caso a solução de projeto atual é avaliada quanto ao cumprimento das funções previamente estabelecidas na etapa de projeto conceitual do componente. Em seguida é avaliada também quanto ao cumprimento dos requisitos e das necessidades de projeto e em conformidade com as restrições de projeto, estabelecidas na etapa de projeto informacional. Em analogia a “prova real”, esta avaliação toma o processo inverso e visa verificar se alguma função, restrição ou requisito que não foi cumprido ou tem-se dúvida do cumprimento com a solução de projeto adotada. Como o processo de projeto tem caráter dinâmico, durante o desenvolvimento pode ocorrer o surgimento de novas necessidades, requisitos e restrições de projeto, e, sobretudo, novas funções do componente. Portanto, estas novas atribuições não podem ser desprezadas na identificação dos parâmetros duvidosos. Os parâmetros listados serão aspirantes à teste. Caso não surjam dúvidas, pode-se seguir para a próxima tarefa, no caso a *1.3.10* -

Avaliação (gerencial) do projeto preliminar do componente, conforme sugere o fluxograma da figura 5-1. Caso contrário, a partir desta lista inicial de parâmetros, sugere-se a realização de uma análise de viabilidade.

Cohan [9] afirma que a realização ou não de um teste com protótipo físico é uma importante tomada de decisão, para tanto, deverá estar fundamentada com base em fatos e análises, pois este tipo de abordagem provavelmente produzirá resultados mais corretos e consistentes. Recomenda-se a aplicação do questionário apresentado na figura 2-4 para investigar a viabilidade técnica do teste de cada parâmetro listado.

Questionário
1. O teste deste parâmetro é necessário?
2. Qual o efeito projetado para: o tempo de desenvolvimento, a qualidade do produto, o custo do produto e o custo de desenvolvimento.
3. O risco é aceitável?
4. Como será avaliado este parâmetro?
5. Isto é possível de ser realizado com protótipos físicos? Foram cogitadas outras alternativas, por exemplo, métodos analíticos?
6. Dispõe-se de estrutura, recurso e prazo para realizar o teste?

Figura 5-4: Questionário para investigar a viabilidade técnica

As questões 2 e 3 carecem de um cuidado especial, dependendo da importância do produto, uma análise econômica simples pode ser necessária. Ao contrário do que se possa imaginar, uma análise desta natureza não significa a inclusão de um tempo desnecessário no processo de desenvolvimento, este tempo maior gasto inicialmente tende a ser economizado em decorrência do possível tempo que seria desperdiçado ao realizar um teste que produzisse resultados insignificantes.

Propõe-se a realização de uma análise econômica com base nos cenários positivos e negativos da realização ou não do teste. O método fornecerá informações de forma quantitativa, ainda que de forma aproximada, se a realização de teste acarretará em retorno para a empresa ou se a não realização proporcionará riscos inaceitáveis. Esta abordagem evita que decisões importantes dependam apenas da intuição de uma pessoa.

Antes de iniciar a elaboração do modelo, a equipe de projeto deve verificar se existe algum disponível que fora utilizado para finalidades gerenciais. Possivelmente, um modelo deve ter sido elaborado para apoiar a tarefa *1.3.7 - Estimativa de custo/Análise de viabilidade econômica* (figura 2-4) do modelo de referência.

Caso seja preciso a elaboração, a sugestão de Smith e Reinertsen [8] é a simples comparação do lucro acumulado que é similar ao modelo do ANEXO A . Os dados de entrada são informações que podem ser obtidas junto ao setor de finanças ou marketing como: preço estimado de venda, projeção de vendas, custo meta, despesas operacionais (engenharia, vendas e assistência técnica, marketing, etc.). Não deve ser esquecido de verificar se estes dados estão atualizados, correções são comuns em mercados dinâmicos e globalizados. De posse destes dados pode-se elaborar rapidamente o modelo em qualquer planilha eletrônica (excel, lotus, etc.).

A lista dos parâmetros que serão testados será composta daqueles que realmente são necessários, ou seja, de alguma forma produzirão um efeito positivo e, ao mesmo tempo, são viáveis de ser testados.

Sugere-se que depois de identificados os teste e determinados os parâmetros, seja iniciado o preenchimento do relatório de acompanhamento do

teste com as informações geradas nesta sub-tarefa. Este relatório também deverá conter campos que possibilite a inclusão das informações geradas nas próximas sub-tarefas. Esta forma de abordagem contribuirá para a intensificação do histórico do produto. Um modelo de relatório está disponibilizado no APÊNDICE B .

5.3 Planejamento do teste

Baseado nos testes e parâmetros relacionados na tarefa anterior, a primeira atividade que deve ser realizada na etapa de planejamento do teste, conforme sugerido no fluxograma da figura 5-5, é a formulação dos objetivos. Ulrich e Eppinger [11] sugerem que sejam em forma de questionamento onde a resposta será apresentada como resultado ao final do procedimento de teste. Desta forma, devem ser respeitados pelo menos dois requisitos: ser determinado em função dos resultados esperados e ser realístico, conforme destaca Kirkham [31]. Uma redação vaga ou incompleta poderá ocasionar erros de interpretação e proporcionar o desvio das metas reais que prejudicará mais à frente a avaliação do produto [55].

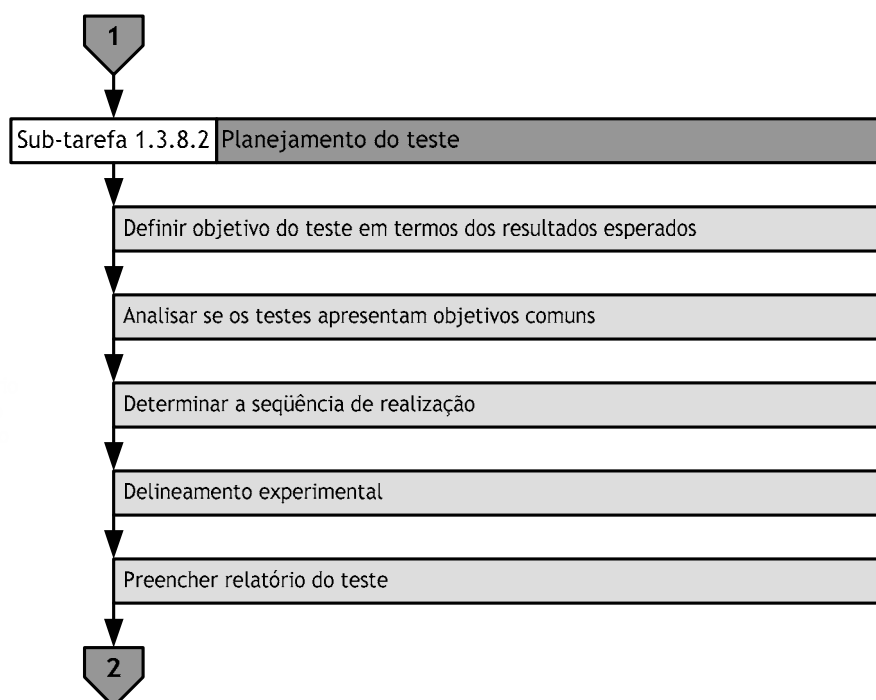


Figura 5-5: Fluxograma da sub-tarefa planejamento do teste

Um único componente poderá ter mais de um parâmetro a ser testado, conseqüentemente, mais de um objetivo. Portanto, depois de redigido os objetivos, deve-se avaliar se os mesmos não apresentam propósitos em comum. Caso positivo os mesmos poderão ser integrados e, até mesmo, compartilhar protótipos.

Diante disto, a equipe de projeto deverá adotar um critério para definir a seqüência de realização dos testes. Um critério imaginável leva em conta o caráter destrutivo do teste. Logo, ao adotá-lo, deve-se dar preferência aos testes que não prejudiquem as características que serão analisadas pelo teste seguinte, no caso de um protótipo ser compartilhado. Uma avaliação estética deverá anteceder uma avaliação funcional, por exemplo. No caso do desenvolvimento acelerado de produtos pode ser conveniente adotar o critério de gargalos, priorizando a realização dos testes que se situam no percurso do caminho crítico.

Definidos os objetivos, propõe-se que seja iniciado o delineamento do teste. Sempre que for possível, o teste em protótipos deve ser considerado como um experimento que ajuda na obtenção de resultados consistentes [11]. Nelson [55] destaca que muitos experimentos de engenharia não utilizam o projeto de experimentos. Um experimento bem projetado e executado é analisado e interpretado de forma mais fácil, além de tornar mais fácil a explicação para aqueles que devem ser convencidos dos resultados. No estudo de caso 2 esta recomendação não foi seguida ocasionando uma avaliação muito qualitativa, portanto sem consistência que os resultados poderiam ter.

Numa forma mais criteriosa de tratamento, devem ser identificadas as variáveis do experimento, o protocolo de teste, quantas, quais e a forma com que as medidas que serão aferidas e analisadas e o número necessário de protótipos.

Sempre que cabível o delineamento do experimento deverá se basear em um procedimento estatístico considerando: modelo estatístico, população e amostras, dados válidos, projeto de experimentos, forma de análise dos dados, intervalos de confiança e nível de significância. Nelson [55] enfatiza que a maioria dos livros de estatística para projeto de experimentos aborda modelos estatísticos e análise de dados, porém poucos dedicam atenção suficiente em princípios experimentais adequados que a maioria dos engenheiros e estatísticos aprendem somente no trabalho. Um exemplo deste fato pode ser explicado no caso de teste ergonômico da pega de uma jarra. Em um dado momento do desenvolvimento, a equipe de projeto se vê diante de uma dúvida: realiza ou não uma modificação no projeto da pega que possibilitará uma grande redução no custo do produto e, além disso, facilitará a fabricação do molde e o processo de moldagem do produto, mas pode piorar o desempenho do produto em relação à ergonomia. A equipe pode realizar um teste para aferir o quanto estas modificações afetarão o produto do ponto de vista do consumidor, ou seja, ele comprará o produto mais barato ou mais ergonômico. A equipe pode rapidamente resolver este problema com a construção de protótipos dos dois produtos. Em seguida, realizar o experimento em uma amostra representativa da população dos possíveis consumidores de seu produto. Os dados levantados neste experimento, depois do devido tratamento, proporcionarão um resultado que fornecerá subsídios para uma escolha fundamentada de qual pega deverá ser utilizada na jarra.

Como atividade final da sub-tarefa planejamento do teste está o preenchimento do relatório de acompanhamento do teste. As informações geradas no planejamento do teste, desde o objetivo do teste, até o delineamento

experimental devem ser incluídas neste documento, que também deve conter as principais datas, os prazos e os recursos.

5.4 Confeção do protótipo do componente

Neste item são descritas as atividades dispostas no fluxograma apresentado na figura 5-6 que foram consideradas necessárias para assegurar que o protótipo seja adequado para a realização do teste.

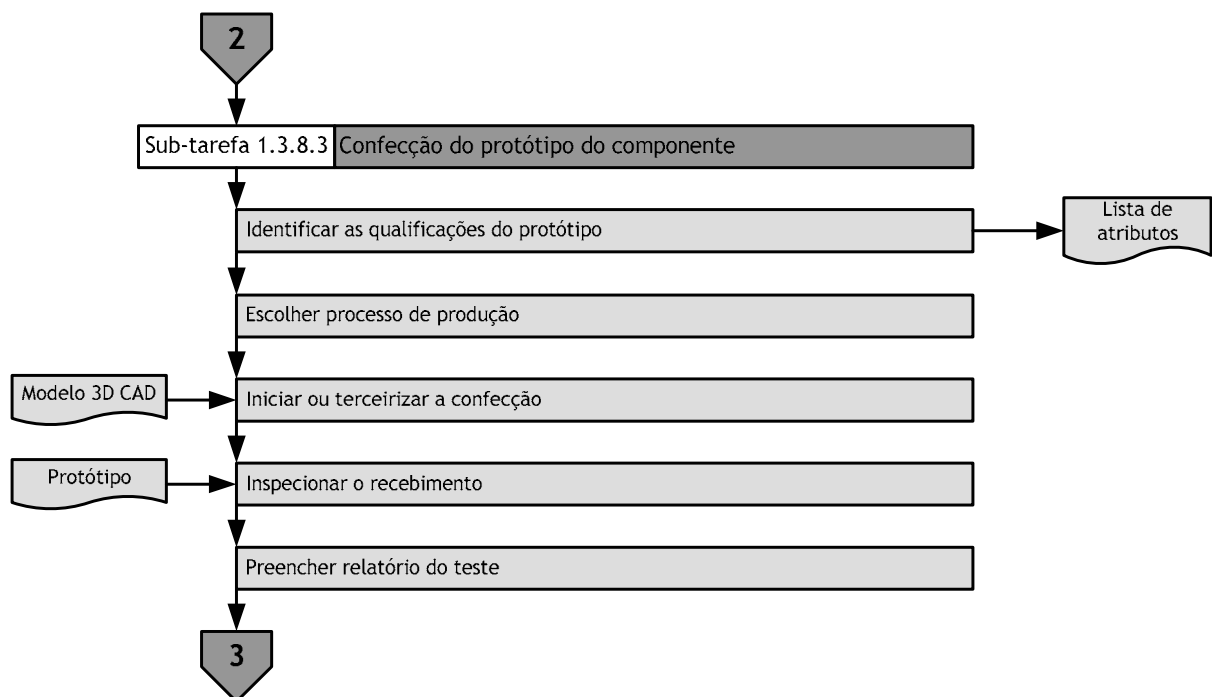


Figura 5-6: Fluxograma da sub-tarefa confecção do protótipo do componente

Com base na premissa de Ulrich e Eppinger [11] deve-se escolher o protótipo que consiga da forma mais simples responder à dúvida estabelecida no objetivo do teste, ou seja, aquele que possua a qualificação mínima para a realização do teste prescrito. Pouco adiantará a realização de um teste se uma escolha de protótipo for mal sucedida. A dúvida inicial pode não ser respondida e, possivelmente, ainda surgirão novas dúvidas [36].

Com base na determinação dos objetivos estipulados a equipe de projeto deverá identificar as qualificações necessárias do protótipo para o teste eficaz dos

parâmetros. Quando um protótipo for requisitado a equipe de projeto deverá incluir especificações para garantir que o mesmo tenha as qualificações mínimas. Deve-se também encaminhar as dimensões críticas porque, muitas vezes, por questões econômicas, os protótipos são construídos em pedaços e depois colados. As qualificações na forma de uma lista de atributos necessários deverão ser encaminhadas ao birô de serviço ou setor de prototipagem, servindo de amparo para uma possível não conformidade no protótipo recebido.

A escolha do protótipo não depende somente de qualificação, é uma decisão de compromisso que contempla outros quesitos, como o custo e o tempo de fabricação. Estas duas variáveis devem ser analisadas em conjunto e a equipe deve encontrar uma situação de equilíbrio conforme suas disponibilidades de recursos. Se o tempo não for fator fundamental pode-se confeccionar o protótipo por meio de processos convencionais de fabricação. Geralmente a situação mais comum é a oposta, neste caso a equipe de projeto deverá preferir a fabricação do protótipo através dos processos de prototipagem rápida. O capítulo 3 apresentou os principais processos de obtenção de protótipos rápidos, bem como os principais fatores de escolha entre eles. Conforme já mencionado, não existe um processo melhor e outro pior, depende da aplicação. A figura 3-9 apresenta um gráfico comparativo na condição padrão de construção entre as tecnologias, porém existem parâmetros específicos a cada processo que podem ser ajustados para melhorar o desempenho na precisão dimensional, no acabamento superficial, no tempo de fabricação e no custo do protótipo.

A empresa, se não possuir um setor de construção de protótipos, fatalmente terceirizará este serviço devendo, desta forma, cadastrar os possíveis fornecedores, identificando: os processos disponíveis, os prazos de entrega e

pagamento. Uma lista de fornecedores de protótipos rápidos está incluída no APÊNDICE A . É importante que o orçamento não fique por conta somente do setor de compras da empresa.

A fabricação do protótipo rápido tem geralmente como entrada o arquivo STL, porque para obter um protótipo rápido a equipe deverá dispor de um modelo do componente neste formato. Os sistemas CAD comerciais apresentam este formato de conversão, porém diferem apenas na forma de entrada dos parâmetros de conversão. No *software SolidWorks*, por exemplo, existem duas opções pré-definidas, uma grosseira e outra refinada. A grosseira deve ser evitada, pois descaracteriza a geometria original. A opção refinada já garante uma conversão adequada para aplicações de prototipagem rápida (máximo desvio de 0,02mm e máximo ângulo de tolerância de 10°). Os parâmetros de transferência de outros softwares se encontram listados no ANEXO B .

De posse do arquivo STL, pode-se efetuar orçamentos com os possíveis fornecedores. Geralmente, os fornecedores brasileiros dispõem de apenas uma tecnologia (SL ou SLS ou FDM). Desta forma, a equipe de projeto deve estar atenta a informações tendenciosas.

A atividade de construção do protótipo termina com o recebimento do mesmo por parte da equipe de projeto. Entretanto, no recebimento do protótipo a equipe deverá certificar-se que o protótipo apresenta as qualificações que foram determinadas na aceitação do serviço. Além disso, a equipe deve verificar possíveis danos referentes ao mau acondicionamento ou transporte dos protótipos. Caso estes danos estejam presentes deve-se contatar o fornecedor e requisitar uma ação corretiva. O estudo de caso 2 evidenciou a necessidade de realizar inspeção do

recebimento de protótipos onde o descuido promoveu o empenamento de algumas regiões, alterando os resultados do teste funcional.

5.5 Execução do teste

Esta sub-etapa aborda as atividades dispostas no fluxograma da figura 5-7 referente à execução do teste.

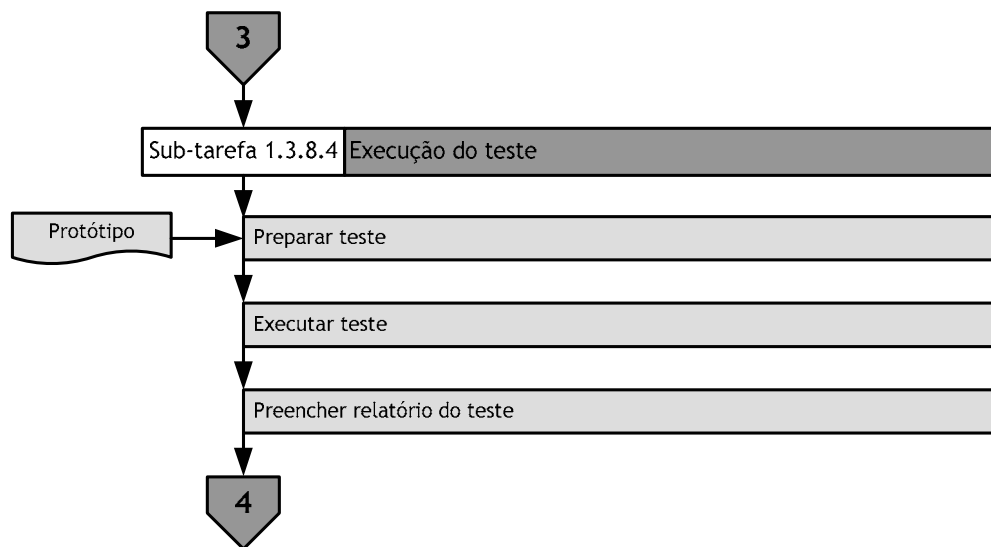


Figura 5-7: Fluxograma da sub-tarefa execução do teste

Antes de iniciar a execução do teste são necessários alguns cuidados preliminares. No protótipo, por exemplo, pode ser necessário realizar alguns preparos, como a melhoria do acabamento superficial, a etiquetagem e a instalação de sensores.

A equipe deve observar sistematicamente o protocolo de teste determinado no caso de uma norma técnica ou procedimento estabelecido no relatório de acompanhamento de teste redigido na atividade de planejamento do teste, de cada um dos parâmetros como forma de garantir que as condições de realização possam ser replicadas.

Durante a execução do teste as medidas efetuadas devem ser registradas no campo apropriado da relatório de acompanhamento de teste. Eventuais problemas e dificuldades na execução também deverão ser registrados.

5.6 Preparação e análise dos resultados e deliberações para o projeto

Enfim, depois da execução do teste inicia-se a última sub-tarefa contemplada por esta sistemática, a preparação e análise dos resultados e deliberações para o projeto, como mostra o fluxograma na figura 5-8.

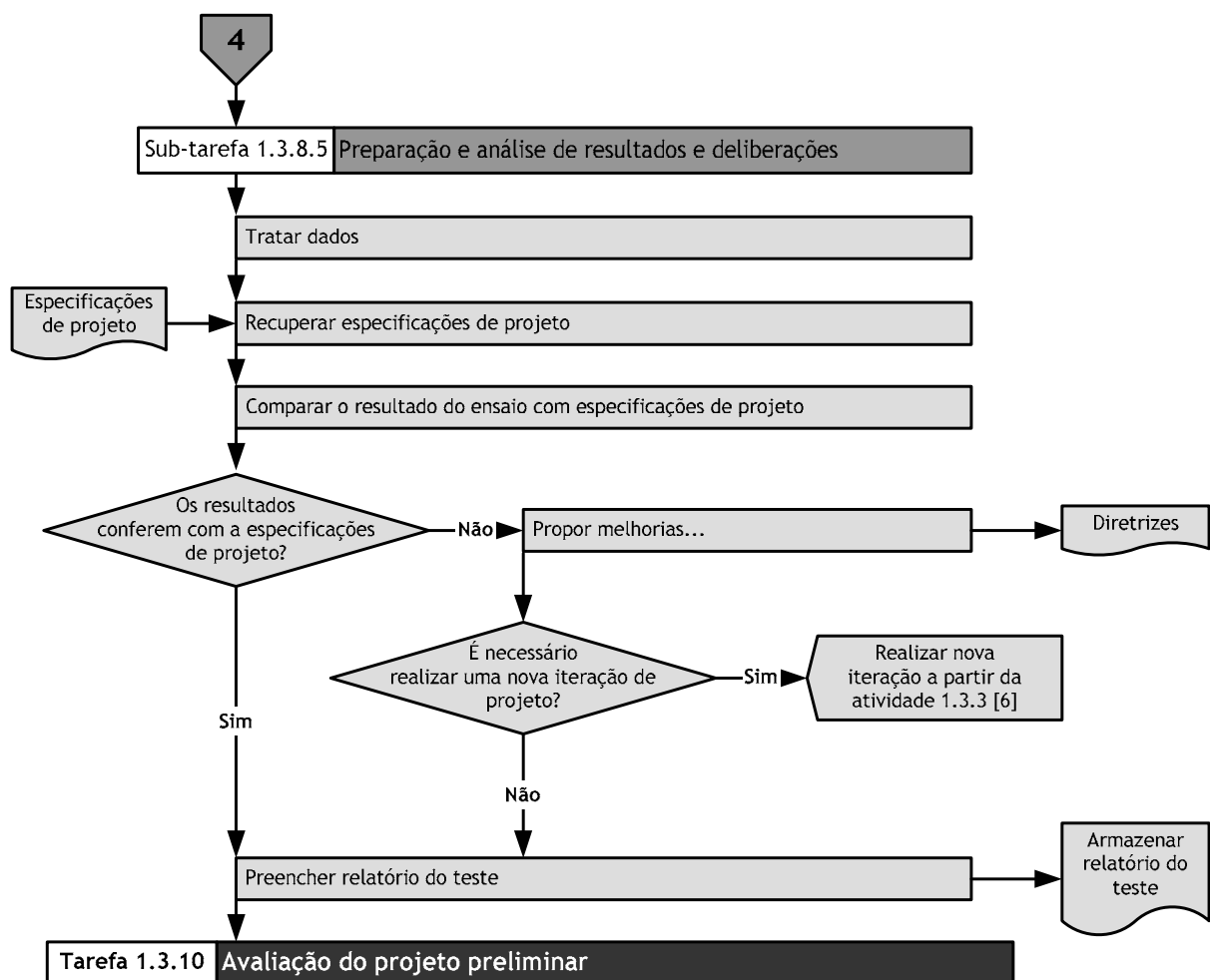


Figura 5-8: Fluxograma da sub-tarefa preparação e análise dos resultados e deliberações para o projeto

A preparação pode vir a ser necessária porque nem sempre os dados que são gerados durante o teste serão aqueles utilizados na análise. Desta forma, quando

necessário, serão pós-processados (convertidos e tratados) para possibilitar uma melhor conclusão. Sugere-se que estes dados sejam dispostos na forma de gráficos que são formas de representação que facilitam o entendimento e compreensão, sobretudo, daqueles que não estão habituados com resultados não trabalhados.

Antes de iniciar a análise dos resultados é fundamental que as especificações de projeto estipuladas na etapa de projeto informacional do componente sejam recuperadas. A partir das especificações a equipe poderá avaliar se os resultados experimentais se encontram dentro da faixa estipulada no início do desenvolvimento. Caso os resultados estiverem fora desta faixa, a equipe de projeto deverá se reunir e propor um conjunto de diretrizes. Mais uma vez, deve-se ter sempre em mente que o protótipo não apresentará as mesmas características do componente moldado por injeção.

As conclusões da análise dos resultados, bem como, das diretrizes deverão ser incluídos no relatório de acompanhamento do teste que deverá ser armazenado para no futuro ser utilizado em desenvolvimentos similares.

Se o nível de modificações for significativo recomenda-se iniciar uma nova iteração de projeto a partir da atividade *1.3.3 - Elaboração do desenho preliminar em sistema CAD 3D* (figura 2-3), proposta por Daré [2]. Caso contrário, a equipe está apta a realizar a avaliação do projeto preliminar do componente sob outras ópticas: gerenciais, econômicas e mercadológicas.

5.7 Adaptação a outro modelo de referência

Esta sistemática foi inicialmente estruturada com base no modelo proposto por Daré [2] e parte do pressuposto que algumas entradas estejam disponíveis. Porém, se a equipe estiver utilizando outra metodologia, não inviabiliza a

utilização desta sistemática, pois conforme apresentado no capítulo 2, de maneira geral, as metodologias de projeto proporcionam os subsídios necessários utilizados nesta sistemática.

A maioria das metodologias promove o aparecimento e sugere o armazenamento de listagens similares às de funções, requisitos, necessidades e restrições. Caso as mesmas não estiverem disponíveis, a equipe de projeto poderá compô-las com base nas informações que dispõe. Iniciando pela identificação das necessidades, requisitos e restrições e finalizando com as funções do produto. Embora, este procedimento não seja o mais apropriado, pois a criação destas listas neste ponto do desenvolvimento poderá ser tendenciosa, já que o conceito e a geometria do componente estarão definidos.

Uma alternativa, no caso destas listas não estiverem disponíveis, é o preenchimento de um questionário estruturado de projeto que são úteis para encontrar rapidamente as questões mais relevantes, apesar de serem abrangentes. Existe uma grande variedade de questionários estruturados na literatura especializada para componentes moldados por injeção, como por exemplo o sugerido pela TICONA [67] no ANEXO C .

CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

A principal contribuição desta dissertação de mestrado está no oferecimento de uma proposta sistematizada para utilização de protótipos físicos, sobretudo os construídos por processos de prototipagem rápida, na avaliação de soluções para componentes moldados por injeção. A sistemática apresenta algumas características que merecem destaque e serão comentadas separadamente, em seguida:

▪ Fundamentação

Esta proposta foi constituída com base em recomendações de literaturas especializadas e no desenvolvimento de estudos de caso nos quais pôde-se prospectar as carências apresentadas nos procedimentos atuais e as dificuldades que uma equipe de projeto supostamente é sujeita no desenvolvimento de produtos moldados por injeção.

▪ Disposição e posicionamento

Acredita-se que a nova disposição, com uma tarefa principal e cinco sub-tarefas secundárias favoreça para que a utilização de protótipos se dê de forma mais prudente, principalmente, ao evidenciar atividades que geralmente são realizadas de forma intuitiva, como as contidas nas sub-etapas *1.3.8.1 - Determinação dos parâmetros de teste* (figura 5-3) e *1.3.8.2 - Planejamento do teste* (figura 5-5), a sistemática contribui para que atividades que terão um grande impacto no resultado da avaliação do produto sejam infundadas.

Apesar de estar introduzida logo após a tarefa *1.3.7 - Estimativa de custo/ Análise de viabilidade econômica* (figura 2-4), esta sistemática poderá ser utilizada quando for necessário realizar um teste com protótipo físico, desde que os subsídios necessários estejam disponíveis, seja na fase conceitual, preliminar ou detalhada do processo de projeto, até porque não existe um momento exato para a realização de testes.

- **Especificidade da proposta**

A proposta não se restringe a questões de caráter técnico do produto. Outras características de grande importância, como por exemplo, a estética e a ergonomia podem ser analisadas.

Espera-se que a sistemática sirva como uma ferramenta que facilite o trabalho da equipe de projeto, mas não como um método de controle ou normativo. Acredita-se que seja flexível o suficiente para que equipes realizem adaptações de acordo com suas necessidades específicas.

- **Análise de viabilidade**

Na sub-tarefa *1.3.8.1 - Determinação dos parâmetros de teste* (figura 5-3) está considerada uma atividade destinada a analisar a viabilidade da execução do teste que na maioria das vezes, é realizada intuitivamente. Os protótipos somente deverão ser usados quando o montante (tempo, recursos, etc.) gasto na fabricação do protótipo e teste do parâmetro trazer benefícios. Esta abordagem destaca a importância da previsão do tempo de desenvolvimento, do volume de vendas, do custo do produto e do custo de desenvolvimento. Empresas na vanguarda já utilizam esta abordagem como sustentação para a tomada de decisões estratégicas.

▪ Formação de histórico

Os resultados de um teste sejam eles positivos ou negativos deverão fazer parte do histórico do produto que é uma forma de documentação permanente. O relatório de acompanhamento do teste sugerido na proposta de sistemática foi introduzido com este propósito.

Apesar da proposta de sistemática não ter sido demonstrada em uma aplicação prática, ela foi idealizada com base em simulações de situações vivenciadas na execução dos testes do estudo de caso 2. Naquelas simulações a sistemática provou ser lógica e coerente, satisfazendo as três premissas consideradas importantes no item 2.1.

Diante das características favoráveis supra citadas, presume-se que a sistemática possa ser utilizada por equipes de projeto na avaliação de componentes moldados por injeção de forma mais criteriosa, atingindo os objetivos inicialmente propostos para esta dissertação de mestrado.

Outro compromisso deste trabalho foi apresentar uma descrição sobre os processos de prototipagem rápida capazes de fabricar protótipos destinados a avaliar componentes moldados por injeção. No capítulo 3, além da descrição, foram apresentadas as principais características que influenciarão a escolha de cada processo. Duas tabelas foram incluídas com a finalidade de prover uma rápida indicação das potencialidades de cada processo, a primeira compara os processos de fabricação de protótipos rápidos e a segunda os processos de fabricação de ferramental rápido. A equipe de projeto deve procurar manter-se atualizada, pois estas tabelas têm vida curta. Fruto do alto investimento em pesquisa e desenvolvimento, processos que no passado apresentavam limitações, hoje se

mostram mais rápidos, confiáveis, precisos e baratos, a estereolitografia é o exemplo positivo disto.

No caso particular do desenvolvimento de componentes moldados por injeção, a experiência é um dos fatores que muito contribuem para um resultado final satisfatório. O processo de projeto destes produtos é cercado de decisões de compromisso que implicarão no custo do produto, custo de desenvolvimento, qualidade do produto e no tempo de desenvolvimento. Somente a experiência permite conjecturar as diversas possibilidades com precisão e escolher as melhores soluções. Os testes com protótipos físicos mostraram-se uma alternativa para apoiar decisões de compromisso, pois quando realizados de maneira planejada e criteriosa produzem resultados contundentes e precisos.

A respeito do crescente aumento da utilização de modelos analíticos, constatou-se que os protótipos físicos ainda são opções viáveis para o processo de projeto de produtos em geral, sobretudo, em equipes de projeto heterogêneas. Nos estudos de caso pode-se ter contato com variados tipos de protótipos físicos. Os produzidos por processos de prototipagem rápida reduzem uma das dificuldades inerentes dos protótipos físicos fabricados por processos convencionais que é o alto *lead time*. Isto permitiu que no estudo de caso 2 fosse possível realizar 2 iterações de projeto durante um período curto de tempo, proporcionando a otimização do produto e a avaliação antecipada do seu desempenho. Se fosse um caso real o produto poderia ter seu lançamento antecipado. Desta forma, os protótipos rápidos devem ser vistos como ferramentas para aumentar a competitividade de uma empresa. Estes processos, no entanto estão disponíveis no mercado, conseqüentemente qualquer empresa poderá utilizá-los. Partindo deste princípio, o

importante é como fazer o uso e obter o maior proveito destes processos. Diante disto, a sistemática se mostra uma alternativa para no mínimo ser explorada.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Em função da importância que deve ser dada às metodologias de projeto, aplicadas à área de produtos de plástico, podem ser sugeridos os seguintes temas para trabalhos futuros:

- ♦ Analisar a sistemática proposta em outros casos;
- ♦ Avaliar a possibilidade de implementação computacional da sistemática (análise de viabilidade e relatório de teste);
- ♦ Desenvolvimento de máquinas nacionais que permitam a confecção de protótipos conceituais com menor custo;
- ♦ Detalhar outras tarefas do modelo de referência proposto por DARÉ [2], como por exemplo:
 - A elaboração da estrutura funcional de componentes moldados por injeção;
 - A estruturação do componente moldado por injeção com base no item anterior, incorporando características estéticas e ergonômicas.

CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DOS SANTOS, Jorge R. L. **Modelos tridimensionais físicos no desenvolvimento de produtos**. Rio de Janeiro, 1999. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- [2] DARÉ, Giovanni. **Proposta de um modelo de referência para o desenvolvimento integrado de componentes de plástico injetados**. Florianópolis, 2001. 219 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.

- [3] BACK, Nelson; FORCELLINI, Fernando A. **Projeto de produtos**. Apostila do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis, 2001.

- [4] BAXTER, Mike. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos**. 2. ed. rev São Paulo: Edgard Blucher, 2000. 261 f.

- [5] GEMSER, Gerda; LEENDERS, Mark A. A. M. How integrating industrial design in the product development process impacts on company performance. **The Journal of Product Innovation Management**. V. 18, nº 1, p. 28-38, 2001.

- [6] PARDOS, F. **Plastics in the World to 2020**. In: ANTEC'99, 1999, New York. **Proceedings of the 1999 Annual Technical Conference**. Society of Plastics Engineers. v.3.

- [7] ALVAREZ, Robert. **Time to market & rapid tooling an OEM prospective**. In: ANTEC'99, 1999, New York. **Proceedings of the 1999 Annual Technical Conference**. Society of Plastics Engineers. v.3.

- [8] SMITH, Preston G.; REINERTSEN, Donald G. **Desenvolvendo produtos na metade do tempo**. Editora: Futura, 1997. 358 f.

- [9] COHAN, Peter S. **Liderança tecnológica: como empresas de alta tecnologia inovam para obter sucesso**. São Paulo: Futura, 1999. 234 f.

- [10] MUNARI, Bruno. **Das coisas nascem as coisas**. Tradução de José M. de Vasconcelos. São Paulo: Martins Fontes, 1998. 378f.

- [11] ULRICH, Karl T.; EPPINGER, Steven D. **Product design and development**. 1ª ed. McGraw-Hill, 1995. 384 f.

- [12] OGLIARI, André. **Sistematização da concepção de produtos auxiliada por computador com aplicações no domínio de componentes de plástico injetados**. Florianópolis, 1999. 349 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [13] HERNANDEZ FONSECA, Antonio J. **Sistematização do processo de obtenção das especificações de projeto de produtos industriais e sua implementação computacional**. Florianópolis, 2000. 180 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [14] MASCARENHAS, Wesley. N. **Sistematização do processo de obtenção do leiaute dimensional de componentes de plástico moldados por injeção**. Florianópolis, 2002. 212 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [15] FERREIRA, Cristiano V. **Metodologia para as fases de projeto informacional e conceitual de componentes de plástico injetados integrando os processos de projeto e estimativa de custos**. Florianópolis, 2002. 330 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [16] FERREIRA, A. B. H. **Novo Aurélio século XXI: dicionário da língua portuguesa**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999. 2128 p.
- [17] FERREIRA, Marcelo G. G. **Utilização de modelos para a representação de produtos no projeto conceitual**. 1997. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico.
- [18] BACKX, Hugo B. O Modelo no Projeto de Produto: Uma Proposta para Classificação de Modelos Tridimensionais. **Revista Estudos em Design**, Rio de Janeiro, v. 2, nº1, p. 81-86, 1994.
- [19] ROOZENBURG, N. J. M.; EEKELS, J. **Product design: fundamentals and methods**. Londres: John Wiley & Sons, 1995. 442 f.
- [20] PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang. **Engineering design: a systematic approach**. 2nd ed. London: Springer-Verlag, 1996. 544 f.
- [21] CHAN, Bill; FINGER, Susan. The role of virtual and physical prototyping and design. **Proceedings of International Conference on Engineering Design - ICED99**, Munich. v. 2, p. 625-630, 1999.

- [22] BROEK, Johan J.; SLEIJFFERS, Wouter; HORVATH, Imre; LENNINGS, Alex F. Using physical models in design. In: CAID & CACD 2000. **Proceedings of CAID & CACD 2000**, Hong Kong.
- [23] CHUA, C. K.; TEH, S. H.; GAY, R. K. L. Rapid prototyping versus virtual prototyping in product design and manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. V15, p. 597-603, 1999.
- [24] WOHLERS, Terry. **Rapid prototyping & tooling state of the industry annual worldwide progress report**. Colorado: Wohlers Associates Inc., 2002.
- [25] PACHE, Martin; Weißhahn, Guido; RÖMER, Anne; LINDEMANN, Udo; HACKER, Winfried. Effort-saving modeling in key stages of the design process. In: **International Conference on Engineering Design - ICED99**, 1999, Munich. **Proceedings of ICED99**, V. 2, p. 625-630.
- [26] LEE-MORTIMER, A. Implementing simultaneous engineering. **World Class Design to Manufacture**, V.1, nº 1, p. 43-47, 1994.
- [27] **ENCONTRO DA PLASTINET**. Documento eletrônico para apresentação em data show. Formato PowerPoint. fev., 2003.
- [28] FOLKESTAD, James E.; JOHNSON, Russel L. Resolving the conflict between design and manufacturing: integrated rapid prototyping and rapid tooling (IRPRT). **Journal of Industrial Technology**. V. 17, n. 4, p.1-7, ago./out., 2001.
- [29] HANSEL, B. Fundamentals of product development: getting to market in ½ the time. In: ANTEC'98, 1998, Atlanta. **Proceedings of the 1998 Annual Technical Conference**. Society of Plastics Engineers. V.3. p. 3080-3083.
- [30] BLANCHARD, B. S.; FABRYCKY, W. J. **Systems Engineering and Analysis**. 2ª ed. Londres: Prentice-Hall, 1981. 738 f.
- [31] KIRKHAM, Roger L. Product testing: setting measurable objectives is the key to success. **Machine Design**. p. 120-122, dez., 1977.
- [32] LÖBACH, Bernd. **Diseño industrial**. Tradução de Jordi Utges i Pascual. Barcelona: Gustavo Gili, 1981. 204 f.
- [33] BÜRDEK, Bernhard E. **Diseño: Historia, teoría y práctica del diseño industrial**. 2. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1999. 390 f.

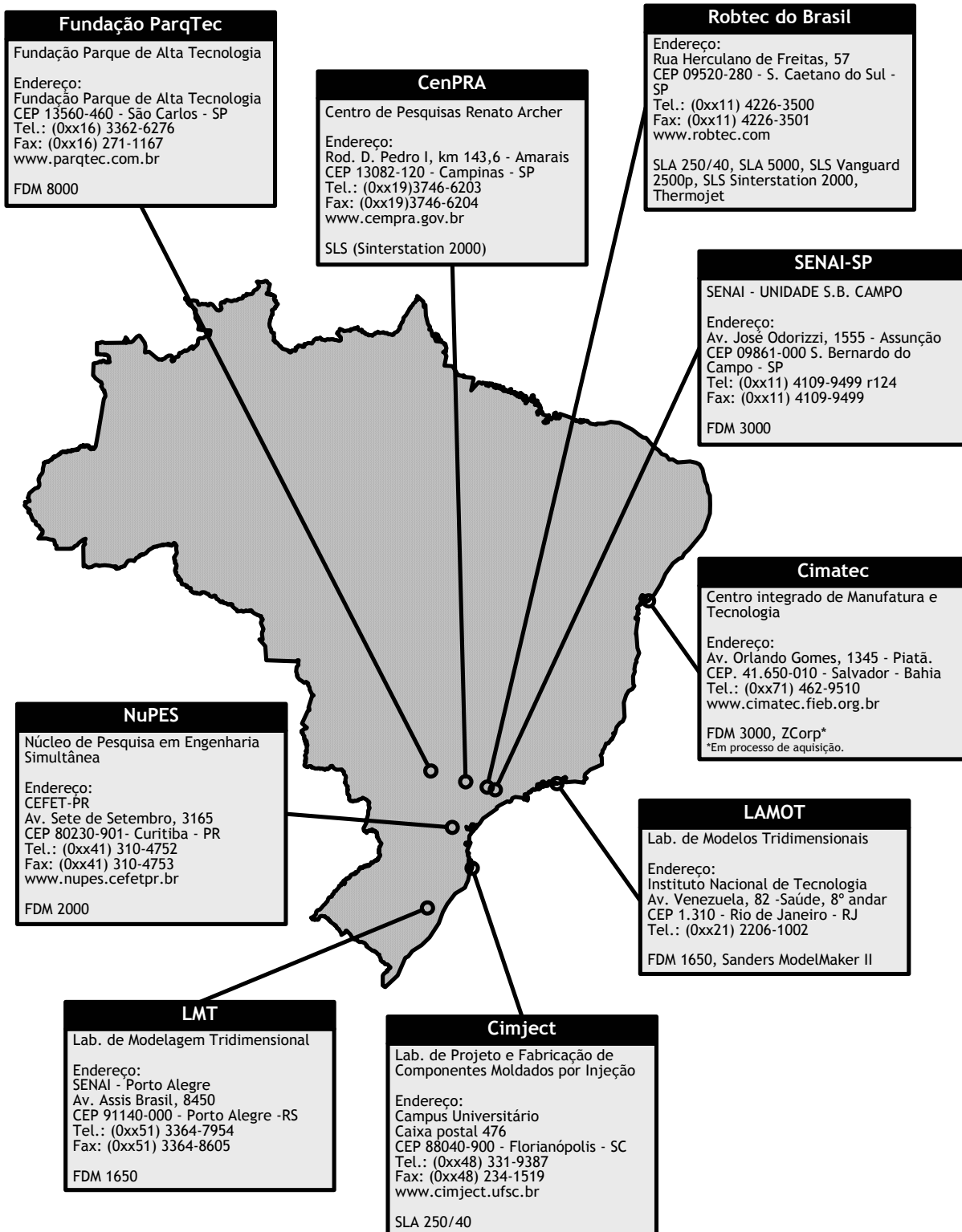
- [34] Magalhães, Cláudio. **Design Estratégico: integração e ação do Design Industrial dentro das empresas.** SENAI/DN - SENAI/CETIQT - CNPq - IBICT - PADCT - TIB, 1997.
- [35] WAI, Hon W. RP in art and conceptual design. **Rapid Prototyping Journal.** v. 7, N° 4, p. 217-219, 2001.
- [36] IIDA, I. **Ergonomia: projeto e produção.** 1997. 4ª reimpressão. São Paulo: Edgard Blücher. 465 f.
- [37] LOPEZ, Samuel M.; WRIGHT, Paul K. The role of rapid prototyping in the product development process: a case study on ergonomic factors of handheld video games. **Rapid Prototyping Journal.** v. 8, n° 2, p. 116-125, 2002.
- [38] BERNSEN, Jens. **Design: defina primeiro o problema.** Tradução de Fernando Vugman e Dulce Márcia Cruz. Florianópolis: Senai/LBDI, 1995. 119 f.
- [39] GRIMM, Todd; WOHLERS, Terry. What's in a Name? **Time-Compression Technologies Magazine.** Disponível em: <http://www.timecompress.com/magazine>. Acesso em 10 de agosto de 2003.
- [40] KOCHAN, D. **Solid freeform manufacturing: advanced rapid prototyping.** Elsevier, 1993.
- [41] CHUA, Chee Kai; LEONG, Kah Fai. **Rapid prototyping: principles and applications in manufacturing.** Singapura: John Wiley & Sons, 1997. 317 f.
- [42] ARNOLD-FERET, B. J. Simple and Concise Design Rules for Rapid Prototyping. In: ANTEC'00, 2000, New York. **Proceedings of the 2000 Annual Technical Conference.** Society of Plastics Engineers. v.3.
- [43] JACOBS, Paul F. **Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography.** Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1992. 420 f.
- [44] JACOBS, Paul F. **Stereolithography and other RP&M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling.** Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1996. 450 f.
- [45] EUROPEAN ACTION ON RAPID PROTOTYPING - EARP. **Why? When? How? Use RPT in the Product Development Process,** BIBA, CRIF, DTI, IPA, 1995.

- [46] ARNOLD-FERET, B. J. Prototyping and Plastic Part Design. In: ANTEC'98, 1998, Atlanta. **Proceedings of the 1998 Annual Technical Conference**. Society of Plastics Engineers. V.3.
- [47] A rapid prototyping primer - Part 1: Stereolithography. **Rapid prototyping report**. Disponível em: <http://www.cadcamnet.com>. CAD/CAM Publishing, Acesso em 10 de agosto de 2003.
- [48] Rapid prototyping materials roundup 2003: Part 1- Stereolithography resins. **Rapid prototyping report**. Disponível em: <http://www.cadcamnet.com>. CAD/CAM Publishing, Acesso em 10 de agosto de 2003.
- [49] A rapid prototyping primer - Part 2: laser sintering. **Rapid prototyping report**. Disponível em: <http://www.cadcamnet.com>. CAD/CAM Publishing, Acesso em 10 de agosto de 2003.
- [50] A rapid prototyping primer - Part 3: fused deposition modeling. **Rapid prototyping report**. Disponível em: <http://www.cadcamnet.com>. CAD/CAM Publishing, Acesso em 10 de agosto de 2003.
- [51] EFUNDA - ENGINEERING FUNDAMENTALS. **Esquema básico do processo FDM**. <http://www.efunda.com>. Acesso em 10 de agosto de 2003.
- [52] Rapid prototyping primer - Part 5: Multijet modeling. **Rapid prototyping report**. Disponível em: <http://www.cadcamnet.com>. CAD/CAM Publishing, Acesso em 10 de agosto de 2003.
- [53] A rapid prototyping primer - Part 4: Three dimensional printing. **Rapid prototyping report**. Disponível em: <http://www.cadcamnet.com>. CAD/CAM Publishing, Acesso em 10 de agosto de 2003.
- [54] MALOY, Robert A. **Plastic part design for injection molding: an introduction**. Munich: Hanser Publishers, 1994. 460 f.
- [55] NELSON, W. **Accelerated Testing: Statistical models, test plans, and data analyses**. Nova York: John Wiley & Sons, 1990. 601 f.
- [56] GOMIDE, Ricardo B. **Fabricação de componentes injetados em insertos produzidos por estereolitografia**. Florianópolis, 2000. 156f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.

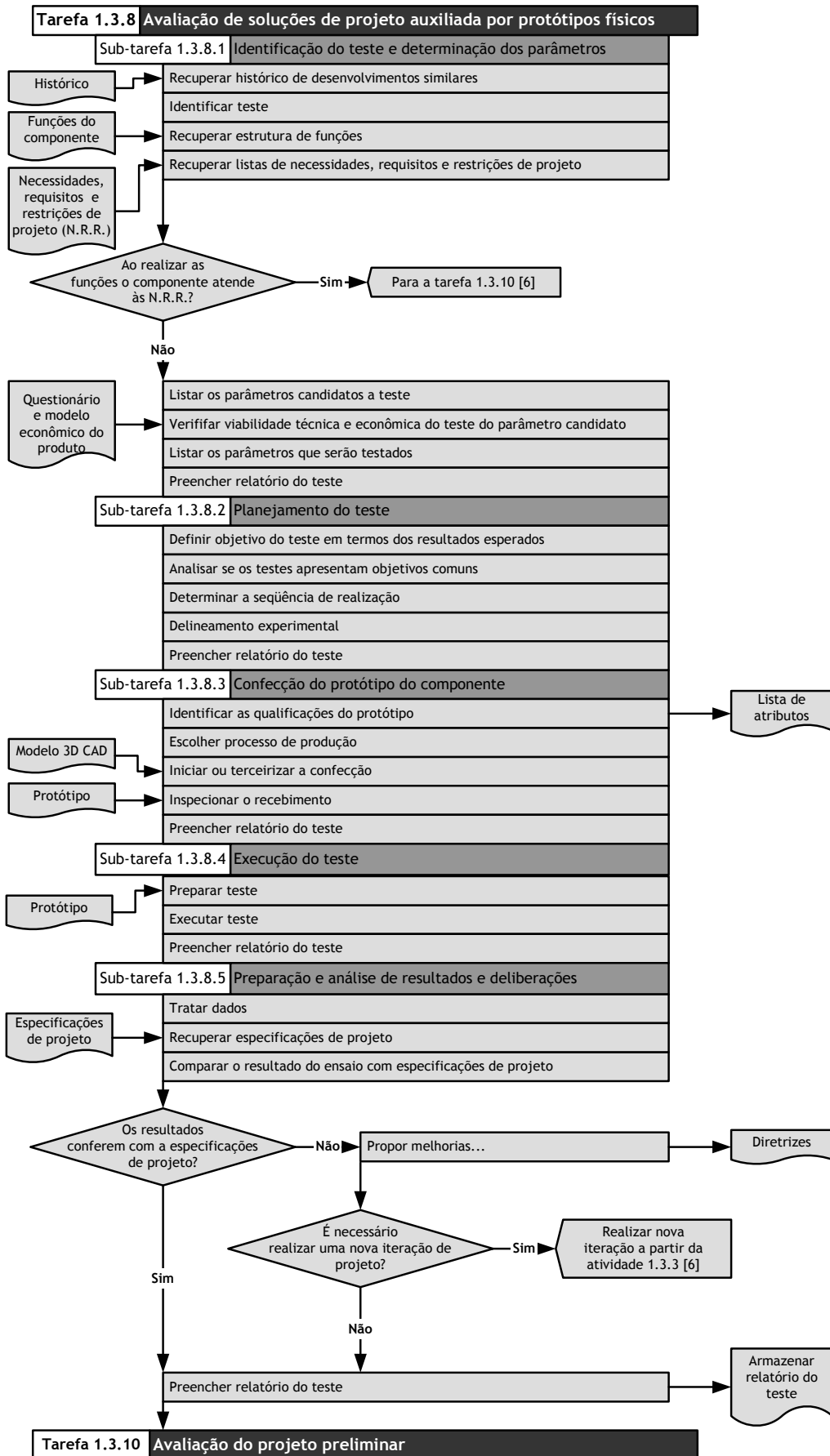
- [57] GRELLMANN, Dauri A. **Utilização das tecnologias de estereolitografia e microfusão para aplicações em prototipagem rápida e ferramental rápido.** Florianópolis, 2001. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [58] BEAL, Valter E. **Avaliação do uso de insertos obtidos por estereolitografia na moldagem de pós metálicos por injeção.** Florianópolis, 2002. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [59] 3D SYSTEMS. **Production Tooling.** <http://www.3dsystems.com>. Acesso em 10 de agosto de 2003.
- [60] MATWEB - MATERIAL PROPERTY DATA. **Propriedades típicas do polipropileno.** <http://www.matweb.com>. Acesso em 10 de agosto de 2003.
- [61] ASHBY, Michael. F. **Materials selection in mechanical design.** Butterworth-Heinemann, 1992. 360 f.
- [62] BRASKEM. **Folha de dados PP H-301.** Disponível em <http://www.braskem.com>. Acesso em 10 de agosto de 2003.
- [63] GRANDJEAN, Etienne. **Manual de ergonomia: adaptando o trabalho ao homem.** 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 1998. 338 f.
- [64] MEISTER, D. & RABIDEAU, G. F. **Human factors evaluation in system development.** Jonh Wiley & Sons, 1965.
- [65] DSM SOMOS. **Folha de dados da resina Somos 7110.** Disponível em <http://www.dsmsomos.com>. Acesso em 10 de agosto de 2003.
- [66] STETTER, R.; PACHE, M.: **Körperliche Modelle in der Produktentwicklung.** Munique: Herbert Utz, 1998.
- [67] TICONA. **Questionário estruturado típico de projeto.** Tradução livre do autor. Original disponível em <http://www.ticona.com>. 2003. Acesso em 10 de agosto de 2003.

APÊNDICES

APÊNDICE A - LISTA DE FORNECEDORES DE PROTÓTIPO RÁPIDO NO BRASIL



APÊNDICE C - FLUXOGRAMA COMPLETO DA SISTEMÁTICA



ANEXOS

ANEXO A - EXEMPLO DE MODELO ECONÔMICO HIPOTÉTICO PARA A ANÁLISE DE VIABILIDADE DO TESTE

Modelo-base

	Hipóteses	Anos						
		-1	0	1	2	3	4	5
A Preço de lançamento	R\$ 2,00		R\$ 2,00	R\$ 1,90	R\$ 1,81	R\$ 1,71	R\$ 1,63	R\$ 1,55
B Evolução do preço	-5% /ano							
C Mercado			1.200.000	1.200.000	1.200.000	1.200.000	1.200.000	1.200.000
D Participação do Mercado			10%	10%	10%	10%	10%	10%
E Unidades vendidas	C*D		120000	120000	120000	120000	120000	120000
F Vendas	A*E		R\$ 240.000	R\$ 228.000	R\$ 216.600	R\$ 205.770	R\$ 195.482	R\$ 185.707
G Custo de lançamento	R\$ 0,60		R\$ 0,60	R\$ 0,59	R\$ 0,58	R\$ 0,56	R\$ 0,55	R\$ 0,54
H Evolução do custo	-2% /ano							
I Custo dos produtos vendidos	E*G		R\$ 72.000	R\$ 70.560	R\$ 69.149	R\$ 67.766	R\$ 66.411	R\$ 65.082
J Margem bruta	F-I		R\$ 168.000	R\$ 157.440	R\$ 147.451	R\$ 138.004	R\$ 129.071	R\$ 120.625
K Margem bruta percentual	J/F		70%	69%	68%	67%	66%	65%
L Pesquisa e desenvolvimento		R\$ 100.000	R\$ 50.000	R\$ 5.000	R\$ 5.000	R\$ 5.000	R\$ 5.000	R\$ 5.000
M Marketing	15% de F	-	R\$ 36.000	R\$ 34.200	R\$ 32.490	R\$ 30.866	R\$ 29.322	R\$ 27.856
N Vendas e assistência	5% de F	-	R\$ 12.000	R\$ 11.400	R\$ 10.830	R\$ 10.289	R\$ 9.774	R\$ 9.285
O Despesas operacionais	L+M+N	R\$ 100.000	R\$ 98.000	R\$ 50.600	R\$ 48.320	R\$ 46.154	R\$ 44.096	R\$ 42.141
P Lucro bruto	J-P	-R\$ 100.000	R\$ 70.000	R\$ 106.840	R\$ 99.131	R\$ 91.850	R\$ 84.975	R\$ 78.484
Q Lucro acumulado	P1 (P1+P2) ...	-R\$ 100.000	-R\$ 30.000	R\$ 76.840	R\$ 175.971	R\$ 267.821	R\$ 352.796	R\$ 431.280
R Retorno sobre vendas	P/F		29%	47%	46%	45%	43%	42%

Projeção para o acréscimo de R\$ 20.000 no custo de desenvolvimento que possibilitem a redução de R\$ 0,10 no custo de lançamento = retorno de R\$ 50.000.

	Hipóteses	Anos						
		-1	0	1	2	3	4	5
A Preço de lançamento	R\$ 2,00		R\$ 2,00	R\$ 1,90	R\$ 1,81	R\$ 1,71	R\$ 1,63	R\$ 1,55
B Evolução do preço	-5% /ano							
C Mercado			1.200.000	1.200.000	1.200.000	1.200.000	1.200.000	1.200.000
D Participação do Mercado			10%	10%	10%	10%	10%	10%
E Unidades vendidas	C*D		120000	120000	120000	120000	120000	120000
F Vendas	A*E		R\$ 240.000	R\$ 228.000	R\$ 216.600	R\$ 205.770	R\$ 195.482	R\$ 185.707
G Custo de lançamento	R\$ 0,50		R\$ 0,50	R\$ 0,49	R\$ 0,48	R\$ 0,47	R\$ 0,46	R\$ 0,45
H Evolução do custo	-2% /ano							
I Custo dos produtos vendidos	E*G		R\$ 60.000	R\$ 58.800	R\$ 57.624	R\$ 56.472	R\$ 55.342	R\$ 54.235
J Margem bruta	F-I		R\$ 180.000	R\$ 169.200	R\$ 158.976	R\$ 149.298	R\$ 140.139	R\$ 131.472
K Margem bruta percentual	J/F		75%	74%	73%	73%	72%	71%
L Pesquisa e desenvolvimento		R\$ 100.000	R\$ 70.000	R\$ 5.000	R\$ 5.000	R\$ 5.000	R\$ 5.000	R\$ 5.000
M Marketing	15% de F	-	R\$ 36.000	R\$ 34.200	R\$ 32.490	R\$ 30.866	R\$ 29.322	R\$ 27.856
N Vendas e assistência	5% de F	-	R\$ 12.000	R\$ 11.400	R\$ 10.830	R\$ 10.289	R\$ 9.774	R\$ 9.285
O Despesas operacionais	L+M+N	R\$ 100.000	R\$ 118.000	R\$ 50.600	R\$ 48.320	R\$ 46.154	R\$ 44.096	R\$ 42.141
P Lucro bruto	J-P	-R\$ 100.000	R\$ 62.000	R\$ 118.600	R\$ 110.656	R\$ 103.144	R\$ 96.043	R\$ 89.331
Q Lucro acumulado	P1 (P1+P2) ...	-R\$ 100.000	-R\$ 38.000	R\$ 80.600	R\$ 191.256	R\$ 294.400	R\$ 390.444	R\$ 479.774
R Retorno sobre vendas	P/F		26%	52%	51%	50%	49%	48%

ANEXO B - PARÂMETROS RECOMENDADOS PARA A EXPORTAÇÃO NO FORMATO STL

3D Studio Max

1. Abra o arquivo.
2. Salve-o como novo arquivo.
3. Selecione partes a geometria de cada vez (nunca por completo, pois pode provocar o travamento do software).
4. Vá até Modifiers/More/Select Meshsmooth/OK.
5. Em Meshsmooth ajuste para 2 ou 3.
6. Note que a estrutura do modelo se torna mais definida coma adição de polígonos.
7. Selecione toda a geometria e exporte no formato STL.

Alibre

1. File
2. Export
3. Save As > STL
4. Digite o nome do arquivo STL
5. Salve

AutoCAD

Antes de tentar converter seu modelo para o formato STL, certifique-se que é um objeto sólido tridimensional.

1. Ajuste FACETRES=10.
2. Utilize o commando STLOUT para converter seu modelo para o formato STL.

CADKey

1. Escolha Stereolithography na opção de exportação de arquivos
2. Digite o nome do arquivo
3. Clique OK

I-DEAS

1. File> Export> Rapid Prototype File> OK.
2. Selecione o objeto que sera convertido
3. Selecione Prototype Device> SLA500.DAT> OK.
4. Ajuste Set absolute facet deviation para 0.000395
5. Selecione Binary > OK.

Inventor

1. Salve o arquivo como cópia
2. Selecione STL
3. Escolha Options > Ajuste para High
4. Entre com o nome do arquivo STL
5. Salve

Iron CAD

1. Part Properties> Rendering
2. Ajuste Facet Surface Smoothing para 150
3. File> Export
4. Escolha STL

Mechanical Desktop

1. Use o comando AMSTLOUT para exportar seu arquivo STL.
2. Os comandos abaixo influenciam a qualidade do arquivo stl, porém os parâmetros pré-ajustados garantem um arquivo bem definido para aplicações de prototipagem rápida.
Angular Tolerance;
Aspect Ratio;
Surface Tolerance;
Vertex Spacing.

Poser

1. Vá até o menu file.
2. Export
3. Exporte o arquivo como 3D Studio.

ProE

1. File>Export> Model
2. STL
3. Ajuste chord height to 0. O campo será trocado pelo valor mínimo aceitável.
4. Ajuste Angle Control para 1
5. OK

Rhino3D

1. File > Save As
2. Select File Type > STL
3. Digite um nome para o arquivo STL.
4. Salve
5. Selecione Binary STL Files

SolidDesginer

1. File> External Save STL
2. Selecione Binary Mode
3. Selecione o modelo
4. Digite o nome do arquivo STL
5. Ajuste Max Deviation Distance para .01mm
6. Clique OK

SolidEdge

1. File > Save As
2. Ajuste Save As Type para STL
3. Options
4. Ajuste Conversion Tolerance para 0.001 in. or .0254mm.
5. Ajuste Surface Plane Angle para 45°
6. Salve

SolidWorks

1. Tools> Options> Export
2. STL Options
3. Ajuste Quality para fine
4. File> Save As
5. Ajuste Save As Type para STL
6. Salve


Think3

1. File > Save As
2. Ajuste Save As Type para STL
3. Salve

Unigraphics

1. File> Export> Rapid Prototyping
2. Ajuste Output type para Binary
3. Ajuste Triangle Tolerance para 0.0025
4. Ajuste Adjacency Tolerance para 0.12
5. Ajuste Auto Normal Gen para On
6. Ajuste Normal Display para Off
7. Ajuste Triangle Display para On

ANEXO C - QUESTIONÁRIO ESTRUTURADO TÍPICO DE PROJETO [67]



Questionário estruturado típico de projeto

1. Qual é a função do componente?
2. Qual é a vida esperada para este componente?
3. É necessária a aprovação por alguma agência? (UL, FDA, USDA, NSF, USP, SAE, MIL spec)
4. Quais são os requisitos elétricos? Em que temperaturas?
5. Qual a temperatura de trabalho? E, por quanto tempo?
6. Quais produtos químicos entrarão em contato?
7. É necessário resistir à umidade?
8. Como o componente será montado? Eles podem ser combinados?
9. A montagem será permanente?
10. Serão utilizados adesivos? Algumas resinas requerem adesivos especiais.
11. Serão utilizados parafusos? Os filetes serão moldados no componente?
12. O componente possui engates rápidos? Materiais reforçados com fibra de vidro requerem força maior para fechar, mas apresentam menor deflexão.
13. O componente estará sujeito ao impacto? Se for, arredonde as arestas vivas.
14. A aparência superficial é importante? Se for, tome cuidado com linhas de solda, linha de partição, localização de ejetores e vestígios do ponto de injeção.
15. Qual será a cor do componente? É algum padrão ou código específico de cor? Os materiais reforçados por fibras não são facilmente coloridos.
16. O componente será pintado? Requer um primer? O componente será submetido a altas temperaturas durante a pintura?
17. A resistência à intempéries e exposição a UV foram considerados?
18. Quais são as tolerâncias requeridas? Elas podem ser relaxadas de modo a tornar a moldagem mais econômica?
19. Qual o peso esperado do componente?
20. A resistência ao desgaste é requerida?
21. O componente precisa ser esterilizado? Com quais métodos (químico, radiação, vapor)?
22. O componente é um inserto moldado ou existe um componente metálico atuando sobre o plástico? Ambos os casos resultam em tensões contínuas no componente.
23. O componente possui alguma dobradiça? Tome cuidado como projeto de dobradiça para materiais cristalinos como o acetal.
24. Qual o carregamento e tensão resultante no componente? E, em que temperatura e condição ambiental?
25. O componente sofrerá carregamento contínuo ou intermitente? Deformação permanente e creep foram considerados?
26. Que deformações são aceitáveis?
27. O componente é moldável? Requer o uso de gavetas? As seções são espessas ou finas?
28. O componente pode ser usinado?
29. Qual a pior situação de trabalho do componente? Os componentes devem ser testados sob estas condições.