

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

AGUILAR SELHORST JUNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS PROCESSOS DE
PROTOTIPAGEM RÁPIDA NA CONCEPÇÃO DE NOVOS
PRODUTOS: UM ESTUDO DE CASO PARA
DETERMINAÇÃO DO PROCESSO MAIS INDICADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador: Prof. Osíris Canciglieri Júnior, Ph.D.

Curitiba, Outubro de 2008.

AGUILAR SELHORST JUNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS PROCESSOS DE
PROTOTIPAGEM RÁPIDA NA CONCEPÇÃO DE NOVOS
PRODUTOS: UM ESTUDO DE CASO PARA
DETERMINAÇÃO DO PROCESSO MAIS INDICADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador: Prof. Osiris Canciglieri Júnior, Ph.D.

Curitiba, Outubro de 2008.



Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção e Sistemas

TERMO DE APROVAÇÃO

AGUILAR SELHORST JUNIOR

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA NA CONCEPÇÃO DE NOVOS PRODUTOS: UM ESTUDO DE CASO PARA DETERMINAÇÃO DO PROCESSO MAIS INDICADO

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção de grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora.

Prof. Osíris Canciglieri Junior, Ph.D. (PPGEPS – PUCPR)
Orientador

Prof. Alfredo Iarozinski Neto, Dr. (PPGEPS – PUCPR)
Membro Interno

Prof. Jefferson de Oliveira Gomes, Dr. (ITA)
Membro Externo

Curitiba, Outubro de 2008.

Dedico minha pesquisa:
As minhas duas razões de viver: Francine e Beatriz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para realização deste trabalho.

Agradeço especialmente:

Ao meu orientador Osíris Canciglieri Junior que ao longo do caminho esteve ao meu lado, como orientador e amigo.

A minha esposa Francine e minha filha Beatriz, pelo amor e alegria que me dão diariamente.

A Megabox Design e Soluções e sua brilhante equipe de designer e amigos: Felipe Locatelli; Wagner C. Nono; Vinícius A. Iubel; João G. Simionato e Frederico Olinger Rocha, sempre presentes e que com parcimônia alegram meus dias.

Ao Prof. Renato Bordenousky Filho, pelo incentivo.

Ao amigo Carlos Eduardo Saura, pela pronta colaboração.

Aos diretores do curso de desenho industrial da PUCPR, Jaime Ramos e José Casela, pela compreensão.

Ao Centro de Pesquisas de Pesquisas Renato Archer pelo auxílio técnico a esta pesquisa.

RESUMO

A prototipagem por meio de sistema CAD/CAM, representa o desenvolvimento e integração de métodos, ferramentas, ambientes e tecnologias que sincronizam projeto e produção. Dois tipos de processos apresentam-se como principais processos de prototipagem por meio de sistema CAD/CAM: a) Prototipagem rápida (RP – Rapid Prototyping) por deposição de materiais, onde os modelos são construídos progressivamente por camadas não havendo necessidade de utilizar quaisquer tipos de ferramentas; e b) prototipagem rápida subtrativa (SRP – Subtractive Rapid Prototyping), onde os modelos são obtidos por desbaste de blocos de diversos materiais. Entender os dois processos citados é trazer esta tecnologia ao desenvolvimento de produtos. Saber definir qual processo de prototipagem em função de suas características materiais, seus custos e a velocidade de prototipagem é o início da utilização destes processos. Portanto essa pesquisa realizou um estudo de caso, buscando um método de definição de qual tecnologia de prototipagem rápida deve ser aplicada em cada produto a ser desenvolvido, através da aplicação de um check-list de importância de elementos que compõem um projeto de produto e da comparação de tecnologias de prototipagem rápida disponíveis para a pesquisa, de forma a entender como a prototipagem pode ser fator determinante na decisão de produzir ou não um determinado produto. E entender como é possível, utilizando a prototipagem rápida, a redução do tempo do ciclo de desenvolvimento e o aumento da qualidade do design e sua previsão de manufatura. Esta pesquisa apresentou um modelo metodológico para determinação para escolha do melhor método de prototipagem, baseado nas características dos produtos a serem desenvolvidos.

Palavras-Chave: Desenvolvimento de Produtos, Prototipagem Rápida, SRP, RP, CAD, CAM.

ABSTRACT

The prototyping through the system CAD/CAM, shows the development and integration of methods, tools, environment and technologies that synchronize project and manufacturing. Two types of processes come as main prototyping processes through the system CAD/CAM: a) RP – Rapid Prototyping: by deposition of materials, where the models are built progressively by layers not having need to use any types of tools; and b) SRP – Subtractive Rapid Prototyping: where the models are obtained by milling of blocks from several materials. To understand the two mentioned processes is to bring this technology to the product's design. The beginning of the use of these processes is to know how to define which prototyping process in function of their material characteristics, their costs and the prototyping speed. Therefore, this research accomplished a case study, looking for a method for a definition of which technology of rapid prototyping should be applied in each product to be designed, through the a check list's application of importance of elements that compose a product project and of the comparison of available technologies of rapid prototyping for the research, in way to understand as the rapid prototyping can be decisive factor in the decision of producing or not a certain product. And to understand how it is possible, using the rapid prototyping, the reduction of the time of the development cycle and the increase of the quality of the design and its manufacture forecast. The research introduced a method model to define the choice for the best prototyping method, based on the product's characteristics in development.

Keywords: Product's Design, Rapid Prototyping, SRP, RP, CAD, CAM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Equipamento de SLA.....	18
Figura 3.2. Representação esquemática do processo de SLA.....	19
Figura 3.3. Equipamento de SLS.....	20
Figura 3.4. Representação esquemática do processo de SLS.....	21
Figura 3.5. Equipamento de LOM.....	22
Figura 3.6. Representação esquemática do processo de LOM.....	22
Figura 3.7. Equipamento de 3DPrint.....	23
Figura 3.8. Representação esquemática do processo de 3DPrint.....	24
Figura 3.9. Equipamento de FDM.....	25
Figura 3.10. Representação esquemática do processo de FDM.....	25
Figura 3.11. Equipamentos e o processo de SRP.....	29
Figura 3.12. Outros equipamentos do processo de SRP.....	30
Figura 3.13. Outros equipamentos do processo de SRP.....	30
Figura 3.14. The Cybaman Replicator.....	32
Figura 3.15. The Cybaman Replicator.....	32
Figura 4.1. Variação do Investimento em um Produto.....	36
Figura 5.1. Modelo da pesquisa.....	53
Figura 6.1. Representação do protetor de cerdas.....	59
Figura 6.2. Vistas do protetor de cerdas.....	59
Figura 6.3. Modelo tridimensional gerado por CAD do protetor de cerdas.....	60
Figura 6.4. Representação da escova dental.....	61
Figura 6.5. Vistas da escova dental.....	62
Figura 6.6. Modelo tridimensional gerado por CAD da escova dental.	63
Figura 6.7. Protótipo em FDM do protetor de cerdas. Imagem externa interna.....	66
Figura 6.8. Protótipo em FDM do protetor de cerdas. Detalhes.....	67
Figura 6.9. Protótipo em FDM da escova dental.....	67
Figura 6.10. Protótipo em FDM da escova dental. Detalhes.....	68
Figura 6.11. Protótipo em SLS do protetor de cerdas. Imagem externa e interna.....	68
Figura 6.12. Protótipo em SLS do protetor de cerdas. Detalhes.....	69

Figura 6.13. Protótipo em SLS da escova dental.....	69
Figura 6.14. Protótipo em SLS da escova dental. Detalhes.....	70
Figura 6.15. Protótipo em 3DPrint do protetor de cerdas. Imagem externa e interna.....	70
Figura 6.16. Protótipo em 3DPrint do protetor de cerdas. Detalhes.....	71
Figura 6.17. Protótipo em 3DPrint da escova dental.....	71
Figura 6.18. Protótipo em 3DPrint da escova dental. Detalhes.....	72
Figura 6.19. Protótipo em SRP do protetor de cerdas. Imagem externa e interna.....	73
Figura 6.20. Protótipo em SRP do protetor de cerdas. Detalhes.....	74
Figura 6.21. Protótipo em SRP da escova dental.....	75
Figura 6.22. Protótipo em SRP da escova dental. Detalhes.....	75
Figura 6.23. Produto Injetado em Polipropileno (PP <i>Random</i>).....	76
Figura 6.24. Produto injetado em Politereftalato de Etila (PET).....	76
Figura 6.25. Protótipos executados em RP do protetor de cerdas.....	77
Figura 6.26. Protótipos executados em RP da escova dental da escova dental.....	79
Figura 6.27. Protótipos executados em RP da escova dental. Detalhes da pega.....	80
Figura 6.28. Protótipos executados em RP da escova dental. Detalhes dos furos de encerdamento.....	80
Figura 6.29. Protótipos e Produto construídos para comparação do protetor de cerdas. Imagens internas.....	82
Figura 6.30. Protótipos e Produto construídos para comparação do protetor de cerdas. Imagens externas.....	83
Figura 6.31. Protótipos e Produto construídos para comparação da escova dental.....	85
Figura 6.32. Detalhes dos furos de encerdamento.....	85
Figura 6.33. Detalhes da pega.....	85
Figura 6.34. Protótipo em RP – SLS.....	91
Figura 6.35. Produto injetado.....	91
Figura 6.36. Protótipo em SRP.....	92
Figura 6.37. Protótipo em RP – FDM.....	92
Figura 6.38. Funcionamento das dobradiças.....	92
Figura 6.39. Funcionamento dos <i>clicks</i>	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Resultado de pesquisa da EPUSP.....	11
Tabela 3.1. Características da Prototipagem Rápida no Brasil.....	26
Tabela 4.1. Planilha de <i>Check-list</i>	50
Tabela 6.1. Planilha de <i>check-list</i> do protetor de cerdas.....	64
Tabela 6.2. Planilha de <i>check-list</i> da escova dental.....	65
Tabela 6.3. Comparação entre os protótipos do protetor de cerdas construídos em RP.....	78
Tabela 6.4. Comparação entre os protótipos da Escova Dental construídos em RP.....	81
Tabela 6.6. Comparação entre os protótipos do protetor de cerdas construídos em SRP, RP (SLS / FDM) e Produto final injetado.....	83
Tabela 6.6. Comparação entre os protótipos da escova dental construídos em SRP, RP (SLS / FDM) e Produto final injetado.....	86

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1. Objetivos com protótipos.....	40
Gráfico 4.2. Principais Aplicações dos Protótipos em Prototipagem Rápida.....	41
Gráfico 4.3. Percepção dos Protótipos.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacture
RP	Rapid Prototyping
SRP	Subtractive Rapid Prototyping
FDM	Fused Deposition Modelling
SLS	Selective Laser Sintering
LOM	Laminated Object Manufacturing
STL	Surface tessellation
SLA	Stereolithography Apparatus
SGC	Solid Ground Curing
SOUP	Solid Object Ultraviolet laser plotter
EOS	Stereos Systems
3DPrint	3 Dimensional Printing
DSPC	Direct Shell Production Casting
UV	Ultra Violeta
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
VMCs	Centros de Usinagem
CNC	Computer Numeric Control
CENPRA	Centro de Pesquisas Renato Archer
R.P.M.	Revoluções Por Minuto
RPD	Rapid Product Development
DFX	Design For “X”
DFM	Design For Manufacturing
PET	Politereftalato de Etila
PP Random	Polipropileno Random
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
POM	Poliacetal

SUMÁRIO

RESUMO	V
ABSTRACT.....	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE GRÁFICOS	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XI

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Contexto	1
1.2 - Apresentação do problema.....	3
1.3 – Objetivos	5
1.4 – Metodologia de pesquisa	6
1.5 – Estrutura do documento	6

Capítulo 2 - METODOLOGIA CIENTÍFICA: ESTUDO DE CASO

2.1 – Metodologia a ser aplicada.....	8
2.2 - Objetivos (Metodologia Científica).....	11
2.3 - Procedimentos técnicos (Metodologia Científica)	11
2.4 - Estudo de caso (Metodologia Científica)	11
2.4.1 - <i>Análise final sobre a metodologia empregada</i>	13

Capítulo 3 – AS TECNOLOGIAS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

3.1 – Prototipagem Rápida.....	14
3.1.1 - <i>Prototipagem Rápida por adição de materiais (RP)</i>	16
3.1.1.1 - Estereolitografia (SLA)	18
3.1.1.2 - Sinterização a Laser Seletivo (SLS)	19
3.1.1.3 - Laminated Object Manufacturing (LOM).....	21
3.1.1.4 - Impressão Tridimensional (3D Print).....	22
3.1.1.5 - Fused Deposition Modeling (FDM).....	24
3.1.2 - <i>Prototipagem Rápida por remoção de materiais (SRP)</i>	27
3.1.3 – <i>Considerações Comparativas entre RP e SRP</i>	33

Capítulo 4 – CONTEXTUALIZAÇÃO DE PROTÓTIPOS EM PROJETOS DE PRODUTOS

.....	36
4.1 – Porque e Quando Fazer Protótipos?.....	36
4.2 – Quais as aplicações dos protótipos?	40
4.3 – Identificação das Complexidades Geométricas	43
4.3.1 – Considerações para um check-list para definição do uso da prototipagem rápida.....	44
4.3.2 – Planilha de Check-List	49
4.3.3 – Arquivos digitais para prototipagem rápida.....	51
4.3.4 – Processo Básico para preparação dos Protótipos.....	52

Capítulo 5 - MODELO METODOLÓGICO PROPOSTO PARA DETERMINAÇÃO DO MELHOR MÉTODO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....

5.1 – Definição da categoria, geometria e uso dos produtos.....	54
5.2 – Análise do produto – check-list dos produtos.	54
5.3 – Definição das tecnologias de prototipagem rápida e construção dos protótipos.	56
5.4 – Avaliação dos resultados	56

Capítulo 6 – PROTÓTIPOS PARA AVALIAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO ATRAVÉS DE ESTUDOS DE CASO.

6.1 – Definição dos produtos para construção dos protótipos dos estudos de caso.....	57
6.1.1 – Protetor de Cerdas de parede fina – Caso 1	58
6.1.2 – Escova Dental de corpo maciço – Caso 2.....	60
6.2 – Definição das tecnologias utilizadas na construção dos protótipos dos estudos de caso.....	63
6.3 – Check-List dos Produtos dos estudos de caso	64
6.3.1 – Check-List do Protetor de Cerdas.....	64
6.3.2 – Check-List da Escova Dental	65
6.4 – Construção dos Protótipos.....	66
6.4.1 – Protótipos Construídos por RP - deposição ou adição de Material.....	66
6.4.2 – Protótipos Construídos em SRP - desbaste ou remoção de Material.....	72
6.4.3 – Produtos Injetados.....	76
6.5 – Análise Comparativa dos Protótipos dos Estudos de caso.....	77
6.5.1 – Comparação entre os protótipos construídos em RP.....	77
6.5.2 – Comparação entre os protótipos construídos em SRP x RP x Produtos Injetados.....	82
6.6 – Avaliação dos resultados	87
6.6.1 – Considerações sobre a comparação dos protótipos construídos em RP.....	87
6.6.2 – Considerações sobre a Comparação entre os protótipos construídos em SRP x RP x Produtos Injetados.....	90

Capítulo 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	
.....	96
7.1 – Conclusão.	96
7.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Contexto

Atualmente a informação, o conhecimento e a capacidade de resposta às necessidades do mercado, são ativos valiosos que as empresas utilizam para estarem competitivas em um mercado que exige uma grande variedade de produtos de qualidade com tempo e custo reduzido, para isso as empresas estão utilizando as novas tecnologias de informação para integrar vários setores das organizações por meio do conhecimento dos indivíduos e de tecnologias e equipamentos, capazes de promover e interpretar os resultados desta integração (FRIEDEL, R. and LIEDTKA, J., 2007).

A integração e a rapidez entre as várias fases do desenvolvimento de produtos são sem dúvida, elementos chave na competitividade entre as empresas. Assim, a passagem rápida do conceito do produto à produção é um incremento de competitividade, que a prototipagem por meio de sistema CAD/CAM (computer aided design/ computer aided manufacture), oferece as empresas como meio determinante para o sucesso do desenvolvimento de novos produtos (FERREIRA, *et al.*, 2006).

Um conceito onde a integração e a rapidez no processo de desenvolvimento de produtos são expressamente relevantes na agregação de vantagem competitiva é o conceito de “*Time-to-market*” (YE, X., *et al.*, 2008). Indústrias de produtos de ciclos rápidos, onde os produtos geralmente têm ciclo de vida por dois anos ou menos, utilizam-se de algumas estratégias que reduzem o tempo de desenvolvimento de produtos (WRIGHT, 2005): (1) “escutando a voz do consumidor” para entender suas necessidades logo no início do ciclo de desenvolvimento; (2) investindo em capacitação técnica para rápida aprendizagem e traduzindo as necessidades dos consumidores em desenvolvimento de novos produtos; (3) desenvolvendo grupos que interagem interdisciplinarmente para engenharia concorrente; e (4) promovendo aprendizado contínuo através de rápidas modificações nos produtos e na extensão das linhas de produto (DATAR, 2001).

Na busca pela integração dos vários setores das organizações industriais e comerciais, a prototipagem rápida pode ser o elemento aglutinante dos diferentes interesses desses setores. Pois a rapidez e consolidação desta integração é elemento chave na competitividade entre as empresas.

Analizando as execuções de protótipos rápidos em tecnologias de remoção ou adição de materiais, vê-se que os protótipos são gerados em questão de horas e não de dias ou semanas, como era antes do surgimento destas técnicas de execução de protótipos.

Uma vez estabelecido o design do produto, que engloba aplicações, usuários, processos e especificações, ou seja, o conceito do produto. O projeto torna-se necessário, onde tal conceito será desenvolvido até encontrar-se pronto para a produção. Essa seqüência estabelece o desenvolvimento de um produto e esse desenvolvimento só terá seus riscos minimizados a partir de que todos os elementos que o compõem sejam examinados por todos aqueles que fazem parte do processo de desenvolvimento (FERREIRA, *et al.*, 2006).

Em determinados momentos do processo de desenvolvimento, modelos e protótipos são fundamentais para tais exames. Ao se finalizar o conceito de um produto, por exemplo, a análise volumétrica do mesmo se faz necessária na medida em que sua análise formal, ergonômica e de usabilidade são fundamentais para expressão do design do produto, neste ponto já possível perceber os valores simbólicos ou alegóricos que o produto representará (ASHLEY 1997).

Assim, a construção de protótipos rápidos é de fundamental presença, pois fisicamente, e não apenas em papel ou imagens virtuais é possível certo grau de interação com o produto ou o volume dele.

Uma vez estabelecido o conceito e os elementos formais do produto o projeto do mesmo se faz necessário e o desenvolvimento é retomado, e todos os aspectos de processos produtivos são desenvolvidos e as questões de meios custos de produção apresentam-se como os riscos desta fase (DVORAK, 2004).

Processos como o de injeção de polímeros, têm na fase de investimentos em ferramentas de produção um custo significativo para implantação do projeto, portanto, minimizar os riscos de implantação é fundamental para o sucesso do projeto. A construção de protótipos funcionais

nesta fase representa a clareza dos problemas a serem enfrentados na produção e principalmente se o funcionamento do produto está de acordo com o idealizado no projeto. Assim, as tecnologias de prototipagem rápida podem auxiliar na tomada de decisão que envolve a fase final do desenvolvimento do produto físico. Produtos complexos tendem a serem mais bem representados em protótipos construídos a partir das tecnologias de RP e produtos com menos complexidade tendem a serem representados de forma satisfatórias nos aspectos de precisão, acabamento, e funcionalidade pela tecnologia de SRP.

Além disso, como estas tecnologias surgiram para atender uma demanda de aumento de velocidade no desenvolvimento dos produtos, elas tendem a operarem cooperativamente onde a deficiência de uma é suprida pela qualidade da outra. É possível fazer partes dos protótipos utilizando uma tecnologia e outra parte utilizando-se de outra tecnologia, compondo assim, protótipos eficientes em termos de custo e tempo (DVORAK, 2004).

O uso das tecnologias de prototipagem rápida depende exclusivamente do propósito do protótipo, a flexibilidade em materiais e tempo da SRP, não necessariamente atende todas as demandas de análise de um protótipo de um produto de injeção polimérica, por exemplo. O mesmo ocorre com os protótipos construídos por adição, nem todos os processos conseguem representar todos os elementos necessários para uma análise de redução de risco.

Essa pesquisa explora a criação de uma forma de análise para os designers e engenheiros possam através das tecnologias integradas de prototipagem virtual e física, desenhar, simular, reduzir erros e produzir novos produtos.

Portanto o objetivo desta pesquisa é, ***“como os designers de produto, em um projeto de um produto industrial, podem definir qual a melhor tecnologia de prototipagem rápida (RP ou SRP) e através destas tecnologias poder reduzir o tempo do ciclo de desenvolvimento e aumentar a qualidade de design e pré-produção deste produto?”***.

1.2 - Apresentação do problema

Dois tipos de processos apresentam-se como principais meios de prototipagem por meio de sistema CAD/CAM: A Prototipagem rápida (RP – Rapid Prototyping), ou “Solid Freeform Fabrication” onde os modelos são

construídos por adição de camadas de material. E a prototipagem rápida subtrativa (SRP – Subtractive Rapid Prototyping), onde os modelos são obtidos por remoção de material.

A prototipagem rápida no desenvolvimento de produtos, em um primeiro momento, tanto a RP (rapid prototyping) quanto a SRP (subtractive rapid prototyping) são ferramentas que buscam testar o *design* e a funcionalidade dos componentes projetados, além da aceitação do produto por parte do público alvo; Com a ajuda dessas tecnologias é possível, em um segundo momento do desenvolvimento de produtos, estudar e determinar os meios de produção pelos quais se obterá o produto em série, com menor custo e em menor tempo. As tecnologias de prototipagem rápida, ao trazer para o processo de criação, a possibilidade de se ter nas mãos os objetos antes mesmo das ferramentas de produção seriada, exatamente como estavam na fase de projeto (objeto virtual), de forma rápida, torna-se uma ferramenta importante na tomada de decisão de produção ou não dos produtos em desenvolvimento (BIBB, *et al.*, 1999).

Assim, trazer esta tecnologia ao desenvolvimento de produtos é fundamental na integração dos setores de design, engenharia, marketing e produção. E a integração dessas áreas é o caminho para um projeto com o mínimo de erros, pois através da prototipagem rápida pode-se imediatamente perceber se o projeto terá ou não terá viabilidade de produção e de mercado.

Para o setor de Design a prototipagem, seja pelo sistema CAD/CAM ou convencional é um agente determinante das decisões de produção e de possível consumo, já que o Design é uma atividade criativa, que tem entre seus objetivos determinar as propriedades formais dos objetos produzidos industrialmente (BIBB, *et al.*, 1999).

A apresentação de alternativas do produto tão somente, já não satisfaz o cliente que contrata o profissional para desenvolver um projeto. A indústria quer: o conceito do projeto, um modelo (não necessariamente físico, mas sim virtual), um protótipo funcional e um acompanhamento do profissional de Design no gerenciamento da produção do produto e no gerenciamento (pelo menos na fase inicial do processo) dos fornecedores. (ASHLEY 1997).

Outro aspecto relevante da prototipagem rápida é a aproximação entre os diversos agentes de desenvolvimento de um produto como os setores de

marketing, design, engenharia, manufatura e etc. Como as novas tecnologias de Prototipagem Rápida estão mais acessíveis, sob o aspecto do custo e usabilidade, modelos e protótipos mais precisos e definidos começam a ser explorados cada vez mais cedo no processo do desenvolvimento dos projetos de produtos.

1.3 – Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é propor uma forma de se determinar o melhor processo de prototipagem rápida, baseado no tipo de produto a ser prototipado. Analisando-se tamanho, complexidade geométrica, custos, tempo de execução, qualidade superficial, nível de precisão e utilização do protótipo. E assim, poder determinar qual tecnologia melhor serve a cada tipo específico de peça.

Para que este objetivo fosse atingido a pesquisa foi dividida em:

- Estudo sobre a metodologia científica estudo de caso;
- Estudo dos processos utilizados de prototipagem rápida de remoção e adição de material;
- Desenvolvimento de um método para análise e determinação do melhor processo de prototipagem rápida baseado no tipo de produto a ser prototipado;
- Avaliação da metodologia proposta no item anterior através de estudos de caso;
- Análise dos resultados;

Esta dissertação apresenta uma contribuição para o conhecimento dos princípios e técnicas utilizados na atualidade para a fabricação de protótipos rápidos para a indústria em geral e principalmente a indústria de injetados poliméricos.

1.4 – Metodologia de pesquisa

Esta pesquisa tem uma abordagem qualitativa; com objetivo exploratório e com procedimentos técnicos para um estudo de caso - utilizando diferentes processos de Prototipagem Rápida, seguindo as fases a seguir:

- a) 1ª Fase: pesquisa bibliográfica preliminar, com o objetivo analisar o tema da pesquisa e verificar a disponibilidade de material bibliográfico;
- b) 2ª Fase: definição do problema;
- c) 3ª Fase: elaboração do projeto de pesquisa;
- d) 4ª Fase: pesquisa bibliográfica;
- e) 5ª Fase: experimentação:
 - Seleção de duas ou mais peças de diferentes complexidades para análise e confecção dos protótipos;
 - Seleção de dois ou mais processos de Prototipagem Rápida;
 - Confecção dos protótipos em dois ou mais processos de Prototipagem Rápida;
- f) 6ª Fase: análise comparativa entre os diferentes processos de Prototipagem Rápida, através das variáveis: aplicabilidade do processo a geometria, custo, tempo, qualidade superficial;
- g) 7ª Fase: análise e discussão de resultados;
- h) 8ª Fase: considerações finais e sugestões.

1.5 – Estrutura do documento

No capítulo 1 foi desenvolvida uma introdução a alguns aspectos que envolvem o desenvolvimento de produtos, aplicação de justificativa, objetivos do projeto de pesquisa, delineamento do estudo de caso e conteúdo dos capítulos.

No capítulo 2 foi realizado um aprofundamento sobre o ambiente de pesquisa, vendo detalhes das metodologias e técnicas utilizadas no geral e na área de Engenharia de Produção, abordando em especial o método Estudo de Caso.

No capítulo 3 foi feita uma revisão da literatura, abordando as principais técnicas de prototipagem rápida por adição e remoção de materiais, além de uma análise comparativa inicial.

No capítulo 4 foi apresentada uma contextualização de protótipos em projetos de produtos.

No capítulo 5, foi apresentado o modelo conceitual da pesquisa com um gráfico de que representa as fases do estudo de caso e do experimento comparativo.

No capítulo 6, foi feito um experimento comparativo entre diferentes tecnologias de Protótipos Rápidos e a Análise destas comparações

No capítulo 7, foram feitas as conclusões desta pesquisa e desenvolvimentos para o futuro.

Capítulo 2 - METODOLOGIA CIENTÍFICA: ESTUDO DE CASO

A pesquisa é uma atividade cotidiana, uma atitude, um “questionamento sistemático crítico e criativo, mais a intervenção competente na realidade, ou o diálogo crítico permanente com a realidade em sentido teórico e prático” (DEMO, 1996). Inicia com um problema que não se tem informações para solucionar, onde um conjunto de ações e propostas é empregado para encontrar as respostas deste problema, que têm por base procedimentos racionais e sistemáticos (SILVA, 2001).

A investigação científica depende de um “conjunto de procedimentos intelectuais e técnicos”, para que os objetivos da pesquisa sejam atingidos e isso se resume na aplicação dos métodos científicos (GIL, 2002). A metodologia é uma preocupação instrumental. Trata das formas de se fazer ciência, cuida dos procedimentos, das ferramentas, dos caminhos (DEMO, 1987). A metodologia de pesquisa deve possuir um estudo descritivo dos aspectos gerais e amplos do contexto a ser verificado e as abordagens podem ser de natureza qualitativa ou quantitativa (OLIVEIRA, 1999).

2.1 – Metodologia a ser aplicada

Segundo Flick (2004), há uma enorme variedade de métodos específicos disponíveis, cada um dos quais partindo de diferentes premissas em busca de objetivos distintos. Cada método baseia-se em uma compreensão específica de seu objeto.

Para Byrman (1989), o desenvolvimento de uma pesquisa científica pode ter duas abordagens: a quantitativa e a qualitativa.

- Pesquisa Quantitativa: considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Requer o uso de recursos e de técnicas estatísticas (percentagem, média, moda, mediana, desvio-padrão, coeficiente de correlação, análise de regressão, etc.) (SILVA 2001).

- Pesquisa Qualitativa: considera que há uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito, isto é, um vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser traduzido em números. A interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são básicas no processo de pesquisa qualitativa. Não requer o uso de métodos e técnicas estatísticas. O ambiente natural é a fonte direta para coleta de dados e o pesquisador é o instrumento - chave. É descritiva. Os pesquisadores tendem a analisar seus dados indutivamente. O processo e seu significado são os focos principais de abordagem (SILVA 2001).

Na pesquisa quantitativa os princípios norteadores são utilizados com as seguintes finalidades: isolar claramente causas e efeitos, operacionalizar corretamente relações teóricas, medir e quantificar fenômenos, criar planos de pesquisa (que permitam a generalização de descobertas) e formular leis gerais (FLICK 2004). Este tipo de pesquisa tem o intuito de classificar, da forma mais clara possível, as relações causais e sua validade. As condições sob as quais os fenômenos e as relações em estudo ocorrem são controladas ao extremo. Os estudos são planejados de tal maneira que a influência do pesquisador possa ser excluída ao máximo.

Segundo Flick (2004), análises da prática da pesquisa mostram que grande parte dos ideais e objetivos formulados com antecedência não podem ser consumados e que apesar de todos os controles metodológicos, a pesquisa e suas descobertas são inevitavelmente influenciadas pelos interesses e pelas formações social e cultural dos envolvidos. Tais fatores influenciam a formulação das questões e hipóteses da pesquisa, assim como a interpretação de dados e relações. A pesquisa qualitativa é orientada para a análise de casos concretos em sua particularidade temporal e local, partindo das expressões e atividades das pessoas em seus contextos locais.

Para Flick (2004), a pesquisa qualitativa apresenta alguns aspectos essenciais: A propriabilidade de métodos e teorias; As perspectivas dos participantes e sua diversidade; a refletividade do pesquisador e da pesquisa; e a variedade de abordagens e métodos na pesquisa qualitativa.

Na atualidade algumas tendências são inerentes a pesquisa qualitativa (Toulmin, 1990):

- O retorno ao oral, que se manifesta em tendências na formulação de teorias e na realização de estudos empíricos em filosofia, lingüística, literatura e ciências sociais, em narrativas, linguagem e comunicação;
- O retorno ao particular, que se manifesta na formulação de teorias e na realização de estudos empíricos, com o objetivo de “não apenas se concentrar em questões abstratas e universais, mas de voltar a tratar de problemas concretos que não aparecem normalmente, mas que ocorrem em tipos específicos de situações”;
- O retorno ao local, que encontra sua expressão no estudo de sistemas do conhecimento, práticas e experiências, novamente no contexto daquelas tradições e formas de vida (locais) nas quais estão fixados, em vez de presumir e tentar testar sua validade universal;
- O retorno ao oportuno, manifesto na necessidade de dispor os problemas a serem estudados e as soluções a serem desenvolvidas dentro de seu contexto temporal ou histórico, e de descrevê-los neste contexto e explicá-los a partir dele.

Nas pesquisas científicas, a área de atuação influencia a técnica e os métodos que serão utilizados. Para Nakano e Fleury (1996) na Engenharia de Produção os métodos de pesquisa mais utilizados são os quantitativos; porém este método, tradicionalmente aplicado à Engenharia, tem limitações.

Algumas idéias diferem do senso comum. A diferença entre pesquisa qualitativa e quantitativa não está na ausência ou na não-manipulação de dados numéricos – na pesquisa qualitativa, os dados numéricos podem ser utilizados como fontes de evidência – mas sim na abordagem e nos métodos utilizados. Ao mesmo tempo em que pode tornar-se “frágil” no que se refere à validade interna, a pesquisa qualitativa ganha no naturalismo, uma vez que o contexto da pesquisa é considerado e não se tem a artificialidade de um experimento de laboratório (GIL, 2002).

A característica central da pesquisa quantitativa está na ênfase que é dada ao objeto em estudo (seja indivíduo organização ou processo). O método quantitativo é impulsionado por um conjunto de questões previamente definidas (extraída da literatura pertinente). Por outro lado a pesquisa qualitativa procura

fugir da noção de que o pesquisador é a “fonte” do que seria relevante, buscando fazer com o que o objeto em estudo eleja o que é importante segundo sua própria perspectiva (BRYMAN, 1989).

Principais métodos de pesquisa usados na Engenharia de Produção:

Métodos de pesquisa	Abordagem principal	Instrumentos
Experimental	Qualitativo	Experimentos
<i>Survey</i>	Quantitativo	Questionários
Estudo de Caso	Qualitativo	Entrevistas e outras fontes
Pesquisa-participante	Qualitativo	Observação direta
Pesquisa-ação	Qualitativo	Observação e participação direta

Tabela 2.1: Resultado de pesquisa da EPUSP. Fonte: Nakano e Fleury, 1996.

2.2 - Objetivos (Metodologia Científica)

Três grupos classificam as pesquisas quanto aos seus objetivos: estudos exploratórios, estudos descritivos e estudos explicativos.

Este estudo tem objetivo exploratório, já que a pesquisa exploratória visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito ou a construir hipóteses. Envolve levantamento bibliográfico; entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado; análise de exemplos que estimulem a compreensão. Assumindo, em geral, as formas de Pesquisas Bibliográficas e Estudos de Caso (GIL, 2002).

2.3 - Procedimentos técnicos (Metodologia Científica)

Os procedimentos técnicos podem ser, segundo Gil (2002): pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, levantamento, estudo de caso, pesquisa ex-post-facto, pesquisa-ação, pesquisa participante e pesquisa experimental.

Esta pesquisa envolverá o estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos e permitirá o seu amplo e detalhado conhecimento (GIL, 2002). Sendo assim, este será um estudo de caso.

2.4 - Estudo de caso (Metodologia Científica)

No estudo caso, as estratégias de pesquisa apresentam vantagens e desvantagens e dependem, em geral, de três condições: a) o tipo de questão da pesquisa; b) o controle que o pesquisador possui sobre os eventos comportamentais efetivos; c) o foco em fenômenos históricos, em oposição a fenômenos contemporâneos. O estudo de caso coloca-se como representação melhor de questões do tipo “como” e “por que”, em que o pesquisador tem pouco controle sobre os eventos e o foco se encontra em fenômenos contemporâneos inseridos em algum contexto da vida real (YIN, 2001).

Segundo Yin (2001), o Estudo de Caso contribui de forma grandiosa para a compreensão que se têm dos fenômenos individuais, organizacionais, sociais e políticos. O pesquisador de Estudo de Caso deve maximizar quatro aspectos da qualidade de qualquer projeto:

1) **validade do constructo:** estabelecer medidas operacionais corretas para os conceitos que estão sob estudo;

2) **validade interna:** para estudos causais ou explanatórios; visa estabelecer uma relação causal, onde são mostradas certas condições que levem a outras condições;

3) **validade externa:** visa estabelecer domínio ao qual as descobertas de um estudo podem ser generalizadas;

4) **confiabilidade:** visa demonstrar que as operações de um estudo, podem ser repetidas, apresentando os mesmos resultados.

Um bom pesquisador de estudo de caso deve se esforçar para desenvolver essa estrutura teórica, não importando se o estudo tenha de ser explanatório, descritivo ou exploratório. Independente de qual estratégia ser abordada, todas tem a sua contribuição. As questões de um estudo; suas proposições; suas unidades de análise; a lógica que une os dados às proposições e os critérios para se interpretar as descobertas, são elementos fundamentais da estrutura de um estudo de caso (YIN, 2001).

Os estudos de caso, em geral são usados para vivenciar um momento atual e vem sendo muito empregado, devido ao poder de superação dos obstáculos e ao modo como a teoria é aplicada na coleta de dados, na definição do projeto da pesquisa e nos seus resultados. Segundo Gil (2002), algumas etapas devem ser seguidas, na aplicação de um estudo de caso:

- **formulação do problema:** é a base de toda a pesquisa, pois sendo a fase inicial requer pesquisa e reflexão profunda das várias fontes bibliográficas;
- **definição da unidade-caso:** refere-se a um caso base que está num determinado contexto. Contudo, o conceito unidade-caso ampliou-se para uma família, grupo social, organização, uma comunidade, nação ou uma cultura inteira;
- **determinação do número de casos:** pode existir um único ou múltiplos casos;
- **elaboração do protocolo:** por conter a coleta de dados e definir como será realizada a sua aplicação é considerada uma eficiente forma de melhorar a confiabilidade do estudo de caso;
- **coleta de dados:** no estudo de caso é considerada a mais completa de todos os delineamentos, pois utiliza entrevistas, documentos e outros meios para adquirir as informações desejadas referentes ao assunto em questão;
- **avaliação e análise dos dados:** por permitir diversas fontes para coleta das informações algumas dificuldades podem ser encontradas na realização da análise e interpretação, é aconselhável estar atento à preservação dos dados colhidos.
- **Preparação do relatório:** por poder ser estruturada de diversas maneiras e pela sua flexibilidade, é feita de maneira mais menos formal em relação aos outros modelos de pesquisa.

2.4.1 - Análise final sobre a metodologia empregada

A revisão da Literatura, ao menos até agora, mostra ser possível definir uma metodologia para a abordagem teórica deste estudo, sob a forma de estudo de casos múltiplos, onde será analisado qual das tecnologias de Prototipagem Rápida deve ser aplicada para distintas complexidades geométricas, definidas ao longo da pesquisa como modelos ideais a serem comparados.

Este estudo de casos múltiplos tem seu direcionamento (*drive*) focado em demonstrar qual o melhor processo de Prototipagem Rápida a ser aplicado na confecção de modelos e protótipos, tendo em vista, as suas complexidades geométricas, suas aplicações, seus custos e qualidade.

Capítulo 3 – AS TECNOLOGIAS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Esse capítulo apresenta as tecnologias de prototipagem rápida, apresentando inicialmente um contexto geral da prototipagem rápida e na sequência os processos de adição de material e de remoção de material.

3.1 – Prototipagem Rápida

Não há como discutir prototipagem rápida sem antes entender onde o protótipo está inserido. Entender termos como, design, desenvolvimento e projeto, é fundamental para esclarecer onde a prototipagem rápida entra no ciclo desenvolvimento de um produto ou conjunto de produtos.

Segundo Kaminski (2004), apesar de design e projeto serem termos muito próximos, eles não são conceitualmente idênticos, e são usados de forma simplista em muitos textos técnicos e acadêmicos. Principalmente no português utilizado no Brasil, onde as traduções de texto do Inglês têm provocado estes desentendimentos dos termos.

Para Kaminski (2004), dentro do processo de desenvolvimento de um produto existem dois momentos distintos, o do design e desenvolvimento e o do projeto. Isso quer dizer que ao se desenvolver um produto é necessário definir quais as aplicações, usuários, processos e especificações que esse produto terá, ou seja, o estabelecimento de um conceito para este produto. Isto caracterizaria design. Já a características to termo projeto envolve aquela parte do processo em que com o conceito desenvolvido se faz necessária a construção deste produto, por vários meios e prazos definidos.

Com estas definições, pode-se entender que há uma sequência para o processo de desenvolvimento de um produto e nesta sequência as tecnologias de prototipagem rápida podem fazer a diferença entre o que pode se tornar um produto ou apenas um conceito dele.

Assim, entende-se que o protótipo rápido pode ser aplicado nestas duas instâncias do processo de desenvolvimento de um produto, hora para a análise conceitual deste produto, hora para compreensão do produto projetado.

Um dos maiores avanços em nossa sociedade industrial foi a obtenção da maioria dos produtos industrializados de forma rápida e fácil, podendo-se definir essa fase da nossa história como a era de diversificação de nosso desejo. As pressões de tempo, qualidade e custos junto com o aumento da variedade de produtos e o processo de competição mundial entre as empresas têm tornado a tecnologia de Prototipagem Rápida (RP de *Rapid Prototyping*) parte integrante dos processos de negócios (FRIEDEL, R. and LIEDTKA, J., 2007).

Segundo Rosochowski e Matuszak (2000), a contínua necessidade de redução do tempo de desenvolvimento de produto (*time to market*) tem aumentado de maneira acentuada a demanda para a construção de protótipos físicos de maneira rápida. Tal fato, associado à crescente complexidade das peças, vem tornando indispensável o uso de técnicas de prototipagem rápida para encurtar o tempo de desenvolvimento do produto, descobrir falhas, e melhorar sua qualidade final.

Um protótipo deve exibir a forma, permitir ajustes e ter a função básica do produto final, mas não deve ser necessariamente idêntico ao modelo de produção. Os testes de desempenho e redesenho do protótipo prosseguem até que esse processo de projetar – testar – redesenhar produza um protótipo que tenha um desempenho satisfatório. O protótipo serve também para se obter uma percepção e avaliação de mercado por meio de demonstrações a clientes potenciais, testes de mercado ou pesquisas de mercado (GAITHER, 2002).

A grande velocidade e variedade de aplicações da tecnologia de informação possibilitaram o surgimento e implantação dos sistemas CAD/CAM/CAE, que por sua vez, tornaram possíveis as análises de fabricação antes do processo fabril em si. (YE, X., et al., 2008).

A prototipagem rápida é mais uma destes sistemas, disponível em tecnologias diferentes. Segundo Garcia (2001), uma abordagem bastante comum consiste em subdividir as tecnologias de prototipagem em dois grandes grupos:

- Prototipagem rápida aditiva, que trabalham por adição de material (FDM, estereolitografia, SLS, LOM) e podem ser chamadas de “*Solid Freeform Fabrication*”.

- Prototipagem rápida subtrativa (SRP – *Subtractive Rapid Prototyping*), onde os modelos são obtidos por usinagem de blocos de diversos materiais.

Atualmente, o termo tradicional “*Rapid Prototyping*” – Prototipagem Rápida vem se tornando mais usual e correto a todo tipo de prototipagem de rápida execução, independentemente do processo de adição ou remoção de material, ou ainda independente do uso ou não das tecnologias que envolvem hardware e software. (DVORAK, 2004).

3.1.1 - Prototipagem Rápida por adição de materiais (RP)

Existem disponíveis ao mercado hoje diversos equipamentos que proporcionam a construção de protótipos rápidos via adição de camadas. Todos estes equipamentos têm em comum a possibilidade de construção de geometrias complexas, sem a necessidade da utilização de nenhum tipo de ferramenta de construção do tipo moldes, ou seja, constroem-se os objetos de forma livre, o que fez surgir recentemente a denominação de “*Solid Freeform Fabrication*” – Fabricação de sólidos de forma livre, pois o termo tradicional “*Rapid Prototyping*” – Prototipagem Rápida vem se tornando mais usual e correto a todo tipo de prototipagem de rápida execução, independentemente do processo de adição ou remoção de material, ou ainda independente do uso ou não das tecnologias que envolvem hardwares e softwares. Já que um protótipo rápido feito em massa de modelar, pode efetivamente apresentar elementos suficientes para a decisão de ir em frente ou não com uma alternativa de projeto de determinado produto.

O termo prototipagem rápida ou rapid prototyping (RP) refere-se a uma classe de tecnologias que podem automaticamente construir modelos físicos a partir de um modelo gerado num sistema CAD (Garcia, 2001). Com estas tecnologias é possível executar testes repetitivos, tais como construir um protótipo, testar, re-projetar, construir e testar novamente. Entretanto, “rápido” é um termo relativo, pois o tempo de construção pode variar entre 3 e 72 horas,

dependendo do modelo da máquina, do tamanho e da complexidade do protótipo (GORNÍ, 2003).

Na construção de uma peça por meio da RP cada tecnologia compartilha dos mesmos passos técnicos: o computador analisa um sólido modelado em ambiente virtual (CAD) e define a fabricação deste objeto através de camadas. Estas camadas são, então, sistematicamente recriadas e combinadas para formar um objeto 3D (WOHLERS 2003).

Busato (2004) indica as etapas do processo de prototipagem rápida:

- 1- Modelagem no sistema CAD (obtenção do modelo 3D);
- 2- Conversão do modelo CAD para o formato “stl” (*surface tessellation* - linguagem utilizada pelas máquinas de prototipagem rápida);
- 3- Verificação da conversão (verificar se não houve erro durante a tradução);
- 4- Criação dos suportes (tipos e localização dos suportes);
- 5- Orientação da construção (horizontal - vertical);
- 6- Fatiamento e preparação para construção (parâmetros de construção e programa de comando numérico);
- 7- Construção (execução do modelo na máquina de estereolitografia);
- 8- Pós-processamento (retirada dos suportes e excesso de resina, pós-cura e acabamento superficial).

Para Volpato (2007), os processos de RP podem ser classificados a partir da forma inicial do material utilizado:

- Baseado em líquido – *Stereolithography Apparatus* (SLA), *Solid Ground Curing* (SGC), *Stereos Systems* (EOS), *Solid Object Ultraviolet laser plotter* (SOUP), entre outros.
- Baseado em sólido – *Laminated Object Manufacturing* (LOM), *Fused Deposition Modelling* (FDM) entre outros.
- Baseado em pó – *Selective Laser Sintering* (SLS), *3 Dimensional Printing* (3DP), *Stereos Systems* (EOS), *Direct Shell Production Casting* (DSPC), entre outros.

3.1.1.1 - Estereolitografia (SLA)

O equipamento de estereolitografia (figura 3.1) constrói a peça pela superposição de camadas de resina polimérica líquida. De acordo com o desenho criado em CAD, os raios laser UV solidificam uma de resina fotossensível, camada a camada dos contornos do objeto pretendido sobre uma plataforma, até completar a formação da peça. A peça completa é removida do equipamento e a resina restante, dentro dos contornos, é curada por meio de aquecimento em forno (GRIMM, 2005). As geometrias que tenham partes desconectadas ou salientes requerem estruturas de suporte para evitar que o objeto desça para o fundo ou flutue livremente na resina líquida, como ilustrado na figura 3.2.

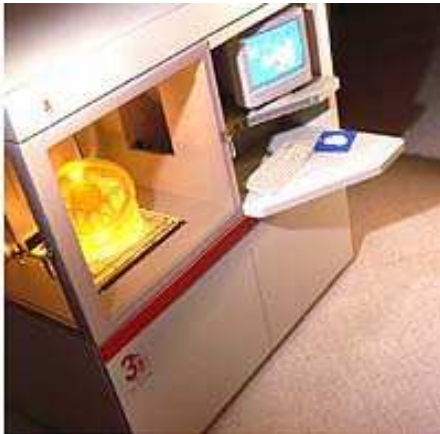


Figura 3.1. Equipamento de SLA. Fonte: (3D System).

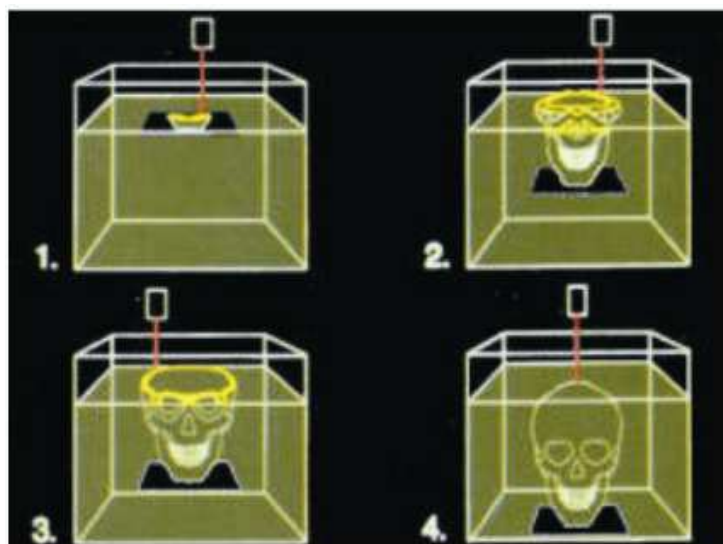
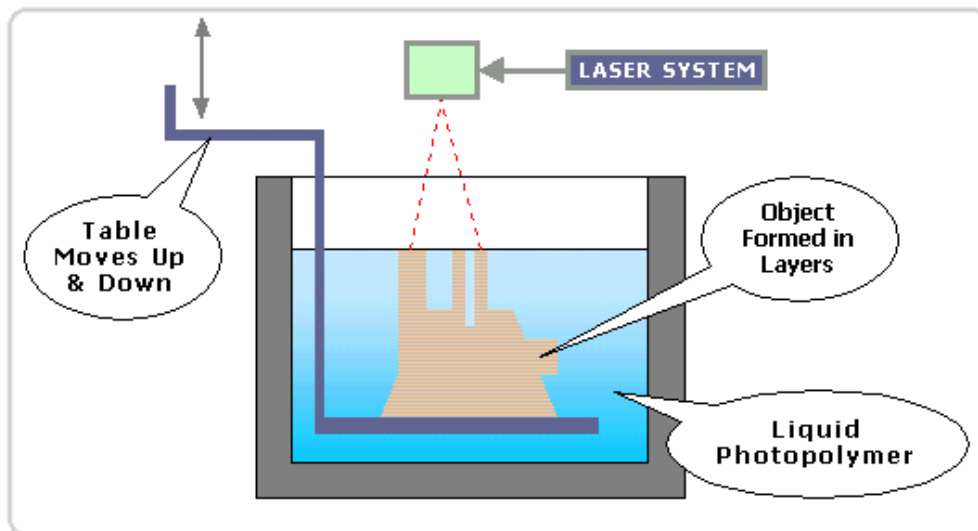


Figura 3.2. Representação esquemática do processo de SLA. Fonte: (ARPTech e 3D System).

3.1.1.2 - Sinterização a Laser Seletivo (SLS)

O equipamento do processo SLS (figura 3.3) constrói objetos tridimensionais pela superposição de camadas, homogêneas de polímeros em pó, entre eles o mais utilizado é a poliamida. As camadas superpostas são ligadas quimicamente entre si por ação do calor de um equipamento de

emissão de laser. Com o processo iniciado, uma fina camada do pó, que se solidifica por ação do laser, é depositada dentro em um cilindro de formação do objeto, posicionado no centro do equipamento. Na seqüência, camadas adicionais do pó são depositadas através de roletes sobre a camada já sinterizada para sofrer a ação do laser, repetindo-se o processo até a formação final do objeto (figura 3.4). O pó não sinterizado pela ação do laser é removido quando a peça estiver completa. Este serve como uma estrutura de suporte para partes salientes e desconectadas. A diversidade de materiais que podem ser usados neste processo é significativa quando comparado a outros processos. Alguns materiais disponíveis para SLS são: poliamida, elastômeros, cerâmica e metal com polímeros aglutinantes para aplicações em ferramental leve (GRIMM, 2005).



Figura 3.3. Equipamento de SLS. Fonte: (CENPRA).

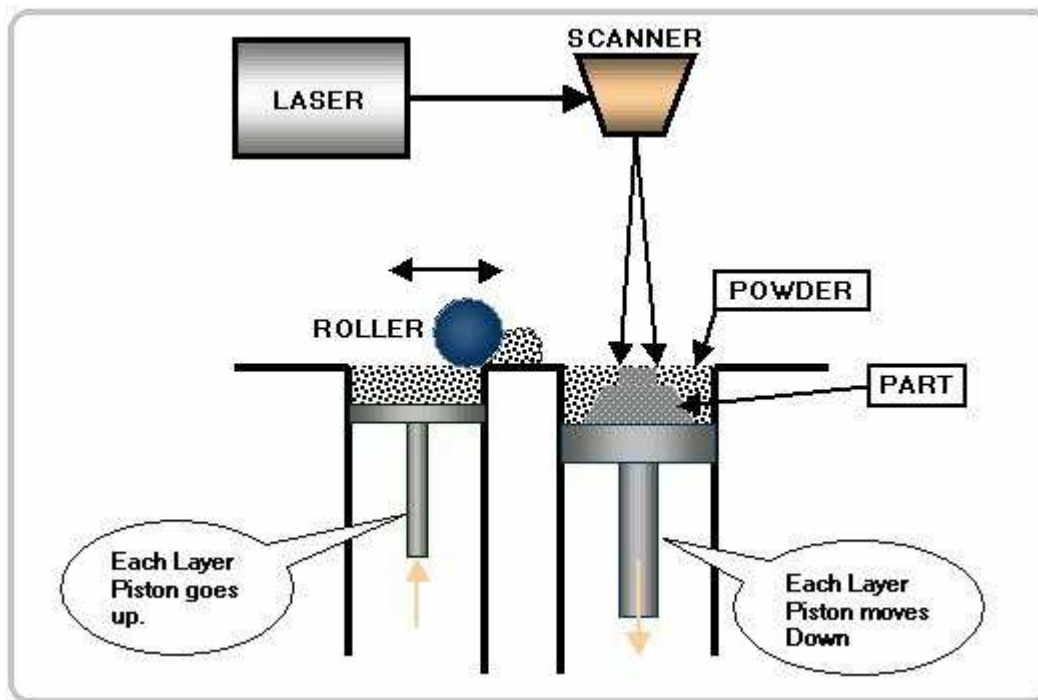


Figura 3.4. Representação esquemática do processo de SLS. Fonte: (ARPTech).

3.1.1.3 - Laminated Object Manufacturing (LOM)

A obtenção dos objetos no processo LOM (figura 3.5), ocorre colando-se sucessivamente folhas de papel, nas quais um feixe laser corta o perímetro exterior correspondente ao corte da camada do objeto. Assim, o processo inicia-se com o desenrolar de um rolo de papel impregnado de cola termoplástica na sua superfície inferior. Seguidamente um rolo pré-aquecido comprime o papel sobre a camada anterior ficando a colagem consolidada (figura 3.6). O corte do contorno da peça na camada é feito por um laser. Existe um equipamento que executa este corte com uma lâmina de metal, entretanto é um processo não muito difundido. O papel de suporte, que não faz parte do componente, é cortado para remoção da peça do interior do bloco formado pela bobina de papel (GRIMM, 2005).



Figura 3.5. Equipamento de LOM. Fonte: (Rede Nacional de Prototipagem Rápida. Portugal).

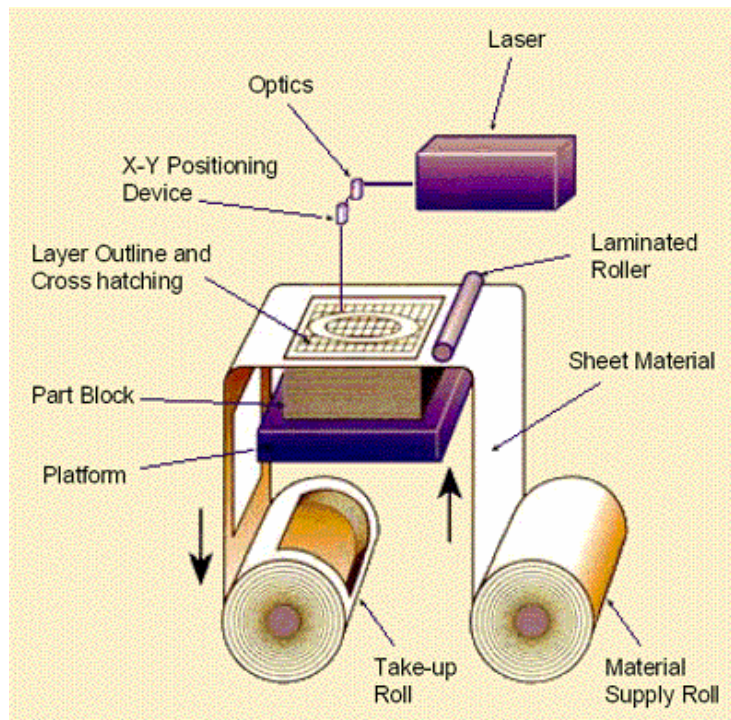


Figura 3.6. Representação esquemática do processo de LOM. Fonte: (Rede Nacional de Prototipagem Rápida. Portugal).

3.1.1.4 - Impressão Tridimensional (3D Print)

Este processo de RP (figura 3.7) utiliza o conceito de impressão de jato de tinta, de impressoras de computadores, sendo o equipamento construído

com parte destas impressoras. Ao invés de utilizar tinta, em seu lugar é utilizado um agente aglutinante. Em um reservatório contendo pó cerâmico ou polimérico uma plataforma se movimenta no eixo Z de coordenadas, onde o pó é aglutinado formando as camadas do objeto, na medida em que a plataforma desce, um rolo carrega nova camada vinda de outra plataforma ascendente (figura 3.8). A movimentação do cabeçote de aglutinante, nas coordenadas x e y, constrói-se o desenho das camadas do objeto sucessivamente, até o fim da construção do objeto, que é retirado de dentro do volume de pó excedente. Após o procedimento de construção é necessária a infiltração de novos elementos químicos na porosidade do objeto construído (GRIMM, 2005).



Figura 3.7. Equipamento de 3DPrint. Fonte: ZCorp.

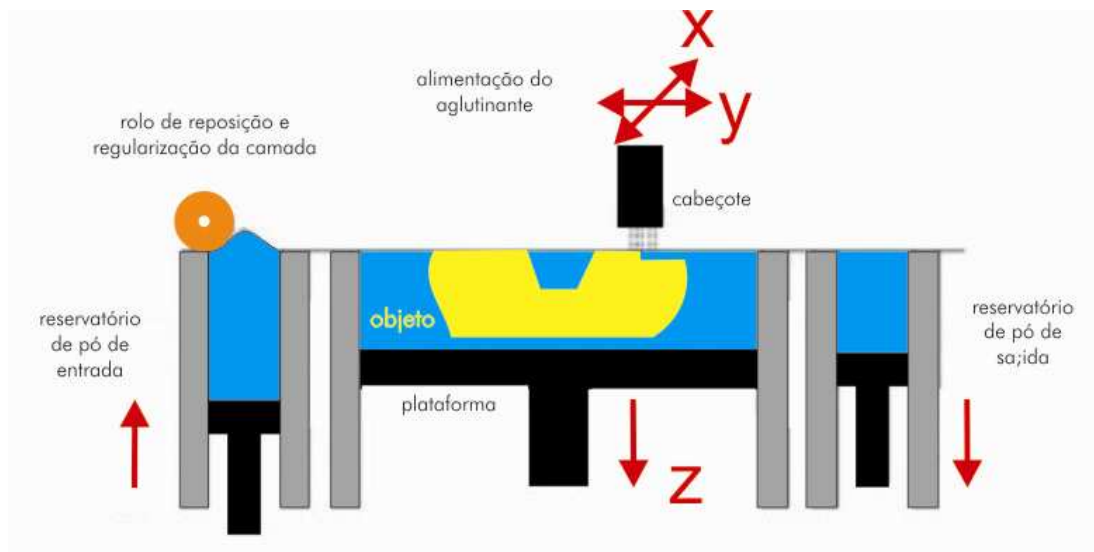


Figura 3.8. Representação esquemática do processo de 3DPrint. Fonte: ZCorp.

3.1.1.5 - Fused Deposition Modeling (FDM)

O processo FDM (figura 3.9), constrói objetos por extrusão de filamentos de polímeros como ABS e Poliamida, aquecidos e com um cabeçote movimentando-se nas coordenadas X Y, além de uma plataforma movimentando-se no sentido vertical coordenada Z. No cabeçote, fios do material termoplástico são direcionados, por guias rotativas, a atravessarem dois bicos extrusores aquecidos. Um bico recebe material para a construção do objeto 3D enquanto outro recebe material para ser utilizado como suporte para a fabricação, como pode ser visto na figura 3.10. Ao final de cada camada a plataforma se desloca para baixo, com uma distância igual à espessura de camada, formando camadas superpostas de filamento até formar o objeto pretendido (GRIMM, 2005).



Figura 3.9. Equipamento de FDM. Fonte: Stratasys.

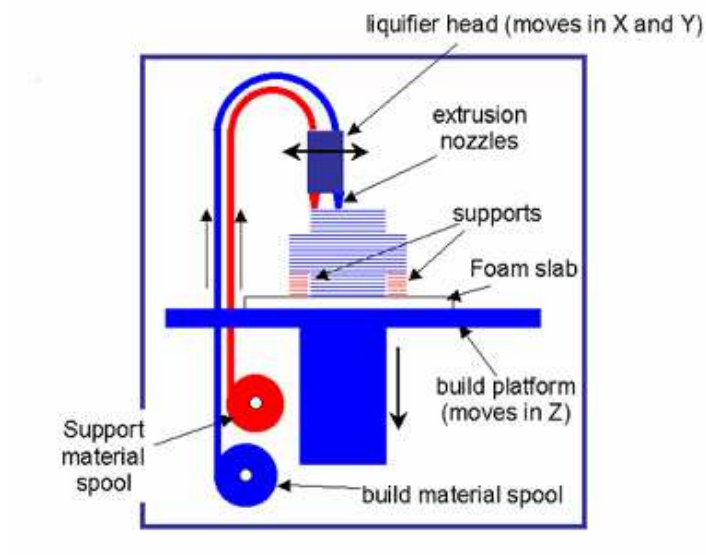


Figura 3.10. Representação esquemática do processo de FDM. Fonte: Xpress3d.

Existem outras tecnologias de deposição de materiais ou RP, entretanto estas são as mais utilizadas e difundidas no Brasil. Para melhor compreensão,

a tabela 3.1 resume algumas características das tecnologias de RP disponíveis no país.

Tabela 3.1. Características da Prototipagem Rápida no Brasil.

Processo / Características	SLA	SLS	LOM	3D Print	FDM
Variedade de Materiais	Pequena	Grande	Pequena	Média	Média
Translucidez	Sim	Não	Não	Não	Sim
Qualidade Superficial	Regular	Boa	Regular	Boa	Regular
Pós-Acabamento superficial	Regular	Boa	Baixa	Boa	Regular
Precisão	Excelente	Boa	Baixa	Boa	Regular
Resistência ao Impacto - simulando Polímeros	Regular	Boa	Baixa	Baixa	Boa
Resistência a Flexão – simulando Polímeros	Baixa	Excelente	Baixa	Baixa	Excelente
Custo do Protótipo – no Brasil	Alto	Médio	Alto	Médio	Médio
Pós-Processo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Pós-Cura	Sim	Não	Não	Não	Não

Fonte: o autor.

É importante perceber que as avaliações colocadas aqui vêm de experiências práticas na obtenção de protótipos por empresas de design ou departamentos de design e engenharia de produtos que terceirizam seus protótipos em agentes que oferecem estes serviços no Brasil, as avaliações são subjetivas, mas percebe-se como é vista a prototipagem rápida no país, por aqueles atores que lidam com o mercado no dia-a-dia de suas atividades (SAURA, 2003).

Os valores dos equipamentos representam parte dos custos dos protótipos gerados e, portanto devem ser observados para uma comparação como processo de SRP. Os preços destes equipamentos nos países de origem têm grande variação, vão desde US\$ 30.000,00 nos equipamentos de 3D Print até US\$ 500.000,00 dos equipamentos de SLS e SLA, e ainda devem-se considerar outros custos, pois os contratos de manutenção elevam os preços dos protótipos consideravelmente (CURTIS, 2006).

3.1.2 - Prototipagem Rápida por remoção de materiais (SRP)

O processo SRP (*Subtractive Rapid Prototyping*) é comumente confundido com o VMC (*Vertical Machining Center*), ou CNC (*Computer Numeric Control*) os centros de usinagem, pelas semelhanças dos equipamentos. A base da tecnologia é a mesma, ambos iniciam o processo de fabricação a partir de um bloco de material, desbastando-o até se obter o objeto desejado. Ambos desbastam uma variedade enorme de materiais desde metais aos mais usuais dos polímeros como o Nylon, ABS, Poliacetal, Acrílicos, etc. Utilizam-se de décadas de desenvolvimento tecnológico em controles de precisão dos eixos de usinagem com servos-motores AC, trocadores de ferramentas, eixos adicionais de usinagem, entre outros. Entretanto, existem diferenças significativas entre o processo de SRP e os centros de usinagem (VMCs). Enquanto os VMCs são otimizados para as confecções de objetos metálicos e ferramental em aço, os equipamentos de SRP são equipamentos pequenos, com perfil de *desktops*, cabendo dentro dos escritórios de desenvolvimento, podendo ser ligados em redes domésticas de energia elétrica e necessitam de pouca manutenção. Trabalham com baixo nível de ruído e não utilizam sistemas de refrigeração e filtragem. São fáceis de operar e geralmente contam com software CAM integrado e otimizado para o processo de prototipagem, proporcionando a possibilidade de designers e engenheiros a criação de protótipos rápidos de excelente precisão e acabamento superficial (CURTIS, 2006).

As propriedades mecânicas dos protótipos ficam por conta dos materiais a serem usinados, que além daqueles polímeros usuais, contam como uma variedade enorme de poliuretanos que cada vez mais simulam os polímeros

pretendidos na produção em escala do protótipo desenvolvido. A utilização de metais não ferrosos também é usual nos processos de SRP.

Os equipamentos, em sua maioria, utilizam os três eixos comuns de usinagem, mas uma variedade considerável tem apresentado um quarto eixo de giro do protótipo e trocadores automáticos de ferramentas, para a usinagem do protótipo em seu verso logo após a finalização da primeira face do objeto. Podendo-se então, iniciar a construção do protótipo e retirá-lo do equipamento ao fim da usinagem sem interferência manual durante o processo.

O acabamento superficial e o tempo de execução dos protótipos também sofrem influência direta do tipo de material, das ferramentas de usinagem e dos controles via software das atividades do equipamento antes da construção do objeto. Assim, a qualidade do acabamento superficial está sujeita ao objetivo final do protótipo e não apenas a qualidade que o equipamento oferece.

Outra possibilidade em alguns equipamentos de SRP é a troca do cabeçote de usinagem por scanner tri-dimensional, capaz de fazer a leitura de objetos muitas vezes construídos manualmente e que servem de base para o desenho CAD, onde se viabilizará a correção de imperfeições de superfícies, para então a usinagem posterior, no mesmo equipamento, de um protótipo mais próximo do pretendido. Esta possibilidade de usinagem e digitalização através de scanner, além dos custos acessíveis e o conceito *plug-and-play* dos softwares que gerenciam a integração CAD/CAM, revela uma das características dos equipamentos de SRP, o conceito *in-house* dos equipamentos, o que sob o ponto de vista da sigilidade é um elemento importante no desenvolvimento de produtos (CURTIS, 2006).

Portanto, a diversidade de materiais e a flexibilidade do processo de SRP, além da velocidade de resposta a execução de protótipos, habilitam este processo ao conceito de prototipagem rápida (*Rapid Prototyping*).



Figura 3.11. Equipamentos e o processo de SRP. Fonte: Roland DG.



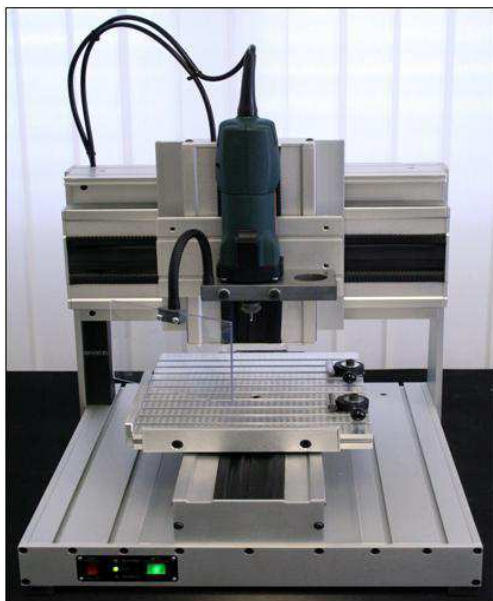
(a) Equipamento SRP – desktop.



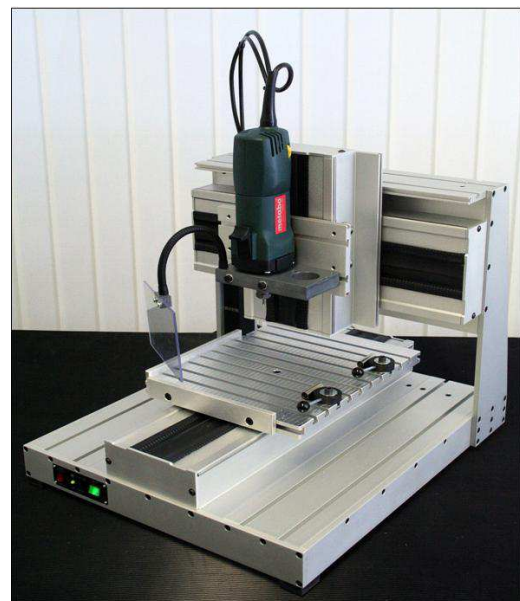
b) Equipamento SRP – desktop.

Figura 3.12. Outros equipamentos do processo de SRP.

Fonte: Minitech Machinery Corporation.



(a) Equipamento SRP – desktop.



(b) Equipamento SRP – desktop.



(c) Equipamento SRP – desktop.



(d) Equipamento SRP – desktop.

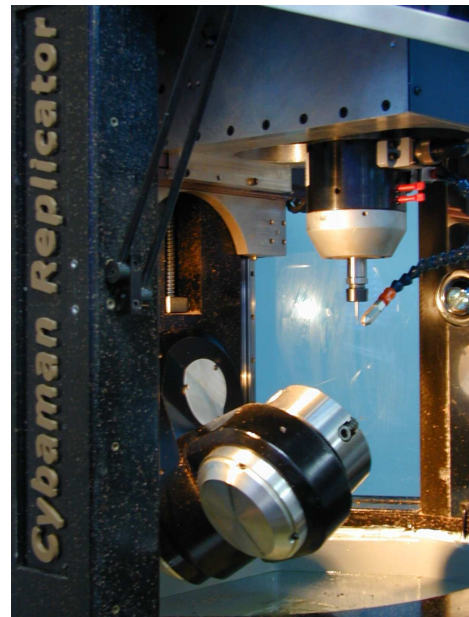
Figura 3.13. Outros equipamentos do processo de SRP. Fonte: Minelli AG CNC System.

Os valores destes equipamentos de SRP variam de US\$ 4.000,00 (*Desktops*) à US\$ 35.000,00 (*Benchtops*) e também se deve levar em conta para a comparação com as tecnologias de RP, os custos que representam os materiais de usinagem e a utilização de fresas, muitas vezes especiais sob o ponto de vista de disponibilidade no mercado (CURTIS, 2006).

Um equipamento que se diferencia dos demais em SRP é o *Cybaman Replicator*, que apesar de ser derivado dos sistemas de CNC (*Computer Numeric Control*) tradicional, apresenta uma novidade no que diz respeito ao funcionamento de seus eixos de trabalho.



(c) Minelli AG CNC System

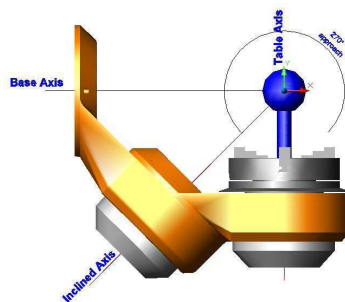


(c) Minelli AG CNC System

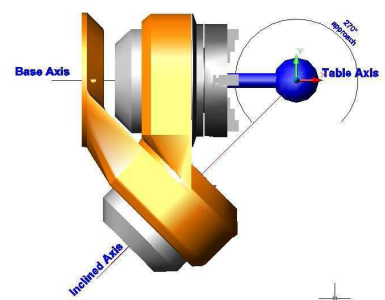
Figura 3.14. The Cybaman Replicator. Fonte: Cybaman Technology.



(a) Imagem do braço



(b) Esquema dos Ângulos de Atuação 1.



(c) Esquema dos Ângulos de Atuação 2.

Figura 3.15. The Cybaman Replicator. Fonte: Cybaman Technology.

O funcionamento do equipamento *Cybaman Replicator* ocorre em cinco eixos e pode alcançar 50.000 R.P.M., onde através de um software CAM - *Replicator System*, que analisa as áreas que podem ser usinadas pela fresa de trabalho - o material é fixado em um braço articulado que é aplicado contra a fresa de usinagem que permanece girando em local fixo, ao contrario dos tradicionais CNC e SRP *desktop*. Esse equipamento de *High Speed* ainda pode receber como opcional, um sistema de digitalização a laser, o que coloca o equipamento nas características, “*in-house*” da tecnologia de prototipagem rápida por remoção (SRP). Entretanto, o que o diferencia dos outros equipamentos de SRP é seu preço, que gira em torno de US\$ 150.000,00 na versão completa com digitalizador, como divulga a empresa *Cybaman Technology* em seu web site www.cybamantech.co.uk.

3.1.3 – Considerações Comparativas entre RP e SRP.

Os mais entusiastas das tecnologias de RP, acreditam que no futuro os equipamentos serão caseiros, onde será possível utilizá-los como uma impressora de papel comum a todos os *desktops* ao redor do mundo. Porém existe ainda uma distância considerável a ser vencida quanto aos preços dos equipamentos e quanto ao desenvolvimento de outras tecnologias que vêm se mostrando eficientes na construção de protótipos e que não usam o conceito básico de adição de materiais em camadas (MALONE and LIPSON, 2007). Em contrapartida ao crescimento da RP, novas pesquisas ao processo de usinagem trouxeram ao mercado equipamentos CNC de bancada com preços mais baixos do que aqueles praticados nos tradicionais centros de usinagem, mostrando-se uma alternativa a RP tradicional, fazendo assim, surgir o conceito de SRP (Subtrative Rapid Prototyping). Estas tecnologias mais acessíveis surgiram para atender uma demanda por equipamentos com preços relativamente baixos aos equipamentos de RP e centros de usinagens tradicionais e demanda de aumento na velocidade do processo de desenvolvimento de produtos em empresas de pequeno e médio porte. O interesse por essas tecnologias de SRP, apresenta-se também em empresas de grande porte e prestadores de serviço que percebem que as tecnologias de

RP e SRP tendem a operarem cooperativamente onde a deficiência de uma é suprida pela qualidade de outra. (PALM, 2002).

Assim pode-se entender que escolha de qual tecnologia utilizar depende exclusivamente do propósito do protótipo. Em uma comparação inicial, pode-se imaginar que a SRP, por sua flexibilidade e custos seja a mais atrativa para produção de protótipos nos vários estágios de desenvolvimento do projeto. Entretanto, os diferentes produtos em desenvolvimento exigem análises mais profundas para definir-se qual tecnologia utilizar. Existem muitas diferenças entre os processos de RP para compará-las diretamente ao processo SRP simplesmente sob o ponto de vista de sistema de construção dos objetos. É importante inserir o processo de SRP no conceito de Prototipagem Rápida, para então compara-lo individualmente aos processos do sistema tradicional de RP ou *Solid Freeform Fabrication* (WOHLERS, Terry and GRIMM, Todd, 2003).

Parece evidente que todos os processos buscam dar respostas a estes problemas, porém as características próprias de cada protótipo a ser construído, e as características de cada processo de RP devem ser analisadas.

Geometrias complexas, onde é necessária a construções de ferramentas que utilizem posições, ou que possuam ângulos negativos para a usinagem, podem necessitar de muito esforço para utilização do processo de SRP, o que na RP tradicional não requer estratégias de construção muito complexas, já que a construção por camadas proporciona a confecção de objetos com qualquer grau de complexidade (RIVETTE, HACOET and MONGOL, 2007). Assim, o importante é compreender qual característica se busca no objeto pretendido: Um objeto de estudo? Uma peça de encaixe que necessita de flexibilidade? Translucidez? Resistência mecânica?

Se objetivo é a construção de peças, permitidas pela usinagem de materiais, não há dúvida de que a SRP é uma boa opção de execução do protótipo de estudos e funcionais.

A mesma tecnologia de RP o que oferece ao mercado processos como:

- O FDM - com filamento em ABS proporcionando durabilidade e resistência;
- O SLS - com base de material em nylon (poliamida) ou metal, oferecendo resistência mecânica e resistência ao calor;
- O SLA - oferecendo translucidez e precisão;

- E a velocidade da 3DPrint;

Não consegue ofertar ao mesmo tempo, em nenhum desses processos, a representação fiel das propriedades dos diversos polímeros, metais ou compósitos (HUR, et al., 2002).

A tecnologia de SRP, mesmo não conseguindo produzir todos os tipos de protótipos funcionais, pelas dificuldades de geometrias complexas e grandes profundidades de usinagem, leva a um questionamento: Se não é possível usinar o protótipo, seria possível viabilizar, sem custos elevados, a produção em escala do produto final? E a uma afirmação: Para a grande maioria dos protótipos, a SRP é capaz de produzi-los a custos razoáveis. Não há nada melhor em protótipos, do que confeccioná-los no material em que será produzido em escala, permitindo testes reais de material com alta precisão dimensional nos protótipos.

Os esforços das indústrias de equipamentos de prototipagem rápida são imensos para tentar resolver questões da representação todos os aspectos possíveis em produtos poliméricos, ou metálicos, ou ainda cerâmicos e compostos. Os equipamentos de SLS, já são capazes de sinterizar camadas de poliamida com vidro, poliamida com metais, e metais não ferrosos. Equipamentos de FDM constroem protótipos com filamentos de ABS, Policarbonato, a combinação entre eles e entre outros polímeros compostos. Equipamentos de SLA constroem protótipos a partir de resinas que simulam o ABS e Polipropileno. E os equipamentos de 3DPrint, são capazes de construir protótipos a partir de gesso com partes coloridas e com propriedades flexíveis. Enquanto os equipamentos de SRP constroem protótipos a partir de quase todos os materiais e compostos (HUR, et al., 2002). Tais possibilidades mostram o quando essas tecnologias podem contribuir para a integração das análises dentro do desenvolvimento de produtos, basta saber o que se quer com o protótipo e entender o que cada tecnologia e processo podem prover ao projeto.

Capítulo 4 – CONTEXTUALIZAÇÃO DE PROTÓTIPOS EM PROJETOS DE PRODUTOS

Este capítulo apresenta as razões pelas quais as empresas no Brasil e no mundo fazem protótipos rápidos, quais suas principais aplicações e quais as complexidades geométricas encontradas em produtos a serem prototipados e produzidos.

4.1 – Porque e Quando Fazer Protótipos?

Segundo Baxter (1998), o volume do investimento em um projeto do produto é sempre menor nas fases iniciais do desenvolvimento do que quando na fase inicial deste produto na economia de escala, segundo ele protótipo é o primeiro de uma série de produtos. Identificando um problema na fase de projeto e desenvolvimento deste produto, é possível reduzir significativamente os riscos do projeto. E apresenta isso de forma clara na figura 4.1.

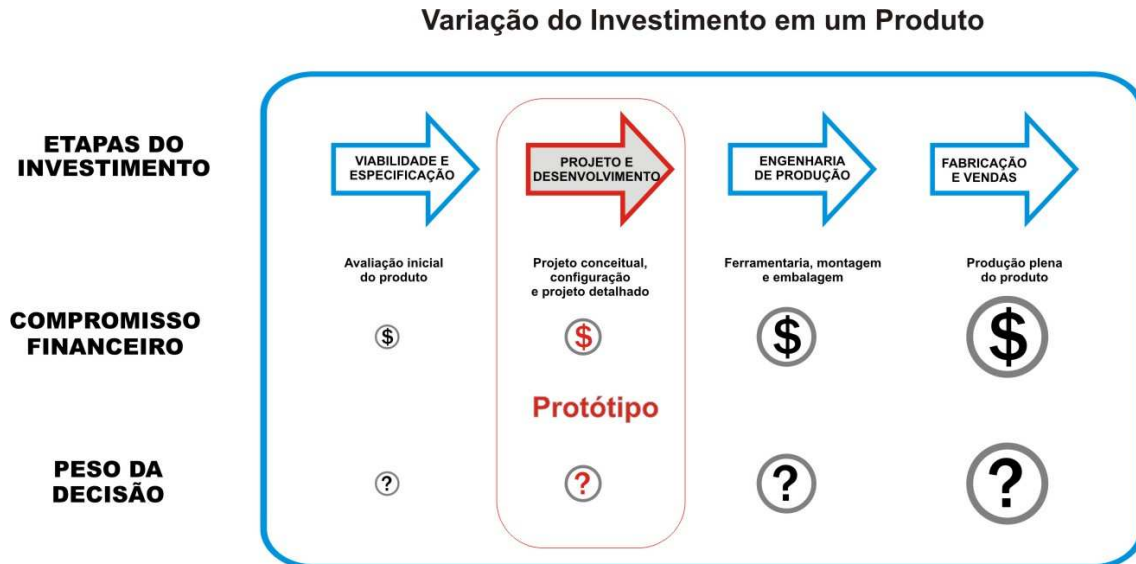


figura 4.1. Variação do Investimento em um Produto. Fonte: BAXTER (1998).

No processo de desenvolvimento de produto o grau de incertezas no início é bem elevado, diminuindo com o tempo, contudo é justamente na fase inicial que se determina a maior quantidade das soluções construtivas. É comprovado que o custo de modificação aumenta exponencialmente ao longo

do ciclo de desenvolvimento, pois a cada alteração um número maior de decisões já tomadas pode ser invalidado e os investimentos já efetuados podem ser totalmente inutilizados devido a uma mudança conceitual do projeto” (SAURA, 2003).

Assim, o investimento em protótipos deve ser feito justamente antes da tomada de decisão no investimento de produção do produto.

Segundo Dalakakis, *et al* (2004), os benefícios da prototipagem rápida só podem ser obtidos eficientemente apenas quando este processo está inserido em um processo inteiro de desenvolvimento do produto. *Rapid Product Development* (RPD), é um processo iterativo que envolve manufatura e a evolução de protótipos rápidos, caracterizado por equipes de design distintas cooperando entre si de forma paralela. Na prática o processo de RPD é reflexo de uma competição pela melhor solução em um grupo de alternativas de soluções, a combinação deste grupo de alternativas, seu desenvolvimento e suas adaptações em um ambiente de troca dinâmico entre as equipes de design, é que irão gerar produtos colocados no mercado com mais qualidade, menos tempo e custo de desenvolvimento (DALAKAKIS, EKC e ROLLER, 2004).

Assim, Smith, P and Clay T. (2000), afirmam que “...se você pensa em múltiplas alternativas, construa múltiplos protótipos paralelamente.” Se designers e engenheiros pensam em caminhos alternativos para resolver um problema de design, construir protótipos para cada opção seria uma boa política, ao invés de pressupor a melhor solução e prototipar apenas um. Com protótipos das alternativas, novas combinações podem aparecer.

O conceito básico de design envolve um processo de alguns passos: (1) Reconhecimento da necessidade do consumidor; (2) Definição do Problema; (3) Busca de informação; (4) Conceituação; (5) Avaliação por meio de desenhos e protótipos; (6) Comunicação de Design por meio de desenhos técnicos, instruções e etc. (DIETER, 1991). Ao passar por esse processo o produto é encaminhado para produção seriada. Entretanto, o direcionamento do design é que fará deste produto um sucesso em relações às suas aspirações (YE, X., *et al.*, 2008).

O conceito de *Design For “X”* (DFX), é certamente um dos mais eficientes conceitos de engenharia concorrente. DFX (*design for “x”*) pode

assumir várias formas tais como, *design for manufacturing* (design para manufatura), *design for inspectability* (design para inspeção), *design for serviceability* (design para serviços), *design for recyclability* (design para reciclagem), *design for usability* (design para usabilidade), etc. (HAGUE, 2003).

Esse direcionamento do design pode ser, e é amplamente auxiliado pelas tecnologias de prototipagem rápida, pois os protótipos provem aos designers e engenheiros uma peça rápida para se ver, encaixar, testar funções e perceber a possibilidade de produção deste produto. Uma das grandes contribuições que a prototipagem rápida trás ao desenvolvimento de produtos é justamente construir protótipos que muitas vezes não são possíveis de se produzir de forma seriada. Isso faz com que cresça o nível de percepção do designer daquilo que é possível ou não de se produzir e analisar onde a complexidade do produto pode ser reduzida para viabilizar sua produção (SMITH, 2002).

Desenvolver um produto visando sua produção intencionalmente é conhecido como desenho para manufatura (DFM – *Design For Manufacturing*), que é uma filosofia de desenvolvimento aplicada desde os estágios iniciais do desenvolvimento de um produto, na busca de se desenhar peças e produtos que podem ser produzidos de maneira mais fácil e econômica (HAGUE, 2003).

Para Hague (2003), alguns princípios básicos de design para uma manufatura eficiente devem ser considerados: (1) Desenvolver um design modular, onde peças de um produto podem se encaixar outros produtos da linha; (2) Usar componentes padrões; (3) Desenvolver peças multifuncionais; (4) Desenvolver peças multiuso; (5) Desenvolver para produção simples. Os quatro primeiros princípios são comumente aplicados no desenvolvimento de produtos. Entretanto o último princípio nem sempre é facilmente aplicado em função dos diferentes meios de produção e processo. Como essa pesquisa envolve principalmente produtos de injeção polimérica em moldes, é neste tipo de processo que irão se basear os princípios de DFM (*design for manufacturing*) que será focada esta análise. Assim, o DFM para moldes de injeção deve seguir alguns princípios:

1- Considerações de espessura de paredes; Peças com paredes finas solidificam mais rapidamente de peças com paredes grossas e por isso reduzem o ciclo de produção (HAGUE, 2003);

2- Uniformidade na espessura de paredes; A não uniformidade das espessuras de parede irão causar expansões e contrações diferentes na peça, resultando em estresse de tensão e compressão (HAGUE, 2003);

3- Evitar cantos retos ou afiados; Esses cantos afiados irão produzir tensões concentradas nestes pontos da peça o que pode provocar falha de preenchimento das cavidades (HAGUE, 2003);

4- Minimizar linhas de solda; A fluidez do material é muito importante para evitar linhas de solda. Ao se colocar obstáculos à fluidez o reencontro da massa após o obstáculo irá gerar linhas de solda, que são marcas de fusão deste reencontro da massa. Essas linhas são pontos de baixa resistência na peça, podendo ser reduzidas no design da peça (HAGUE, 2003);

5- Minimizar marcas de afundamento; Essas marcas são formadas quando uma secção fina solidifica-se antes de uma secção mais grossa, ou seja, secções próximas de diferentes espessuras provocam essas marcas de afundamento ou rechupes, como são conhecidas no Brasil; (HAGUE, 2003).

6- Ângulos de extração; Considerar esses ângulos é facilitar a extração das peças dos moldes (HAGUE, 2003);

7- Minimizar detalhes de encaixe negativo ao ângulo de extração; Reduzir esses elementos, tais como, encaixes, *clicks* e detalhes negativos, é reduzir gavetas manuais ou automáticas e outros sistemas que oneram consideravelmente os moldes de injeção (HAGUE, 2003);

7- Linha de partição; Moldes com linhas de partição e de fechamento simples geram moldes de custos mais baixos. Nem sempre isso é possível nas geometrias cada vez mais complexas dos produtos, mas a busca dessa redução de complexidade na linha de partição é o ideal no conceito de *design for manufacturing* (DFM) para peças injetadas em moldes (HAGUE, 2003);

9- Marcas de gavetas e de pinos extratores; Essas marcas podem ser significativas e podem prejudicar o valor estético da peça, entretanto, com as considerações e posicionamentos adequados essas marcas podem ter o efeito reduzido (HAGUE, 2003).

Essas considerações são importantes na medida em que esta pesquisa visa comparar as tecnologias de prototipagem rápida por adição (RP) e por remoção (SRP), em produtos de injeção plástica. Portanto, conhecer os princípios que proporcionam uma geometria capaz de ser produzida por esse

processo, permite a identificação das peças com geometrias capazes de serem comparadas nas duas tecnologias de prototipagem rápida.

4.2 – Quais as aplicações dos protótipos?

A comparação das tecnologias de prototipagem rápida, parte da definição das geometrias tridimensionais usadas nesta comparação. Para tanto, algumas informações são fundamentais na qualificação das complexidades destas geometrias e uso para quais estas geometrias estão destinadas.

Segundo Wohlers (2005), os protótipos são requisitados por várias razões, que vão desde a percepção para análises objetivas, dimensionais e funcionais, até análises mais subjetivas, formais e semióticas.

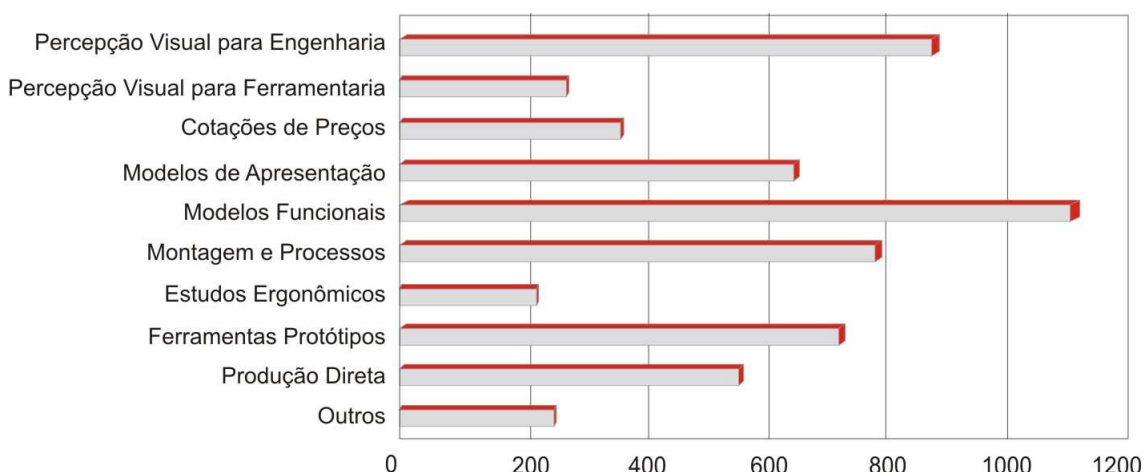


Gráfico 4.1. Objetivos com protótipos. Fonte: Wohlers Report, 2005.

Apesar de um grande número de construções de geometrias a partir das tecnologias de prototipagem rápida, serem utilizadas para apresentações e tomadas de decisão no âmbito da gerência e de marketing das empresas, um percentual significativo, de acordo com o gráfico 4.1, buscam atender a fase de desenvolvimento dos produtos. Estes protótipos têm como a finalidade a tomada de decisão, justamente no âmbito do design deste produto, desde sua concepção formal até a definição das ferramentas de construção seriada,

passando por estudos ergonômicos, estudos de montagem, produção direta e principalmente para os testes funcionais dos produtos.

No Brasil, principalmente entre as pequenas empresas produtoras e prestadoras de serviços de desenvolvimento de produtos, os protótipos são executados com propósitos similares aos levantados por WHOLERS, mas em proporções diferentes em suas utilizações. Segundo Saura (2003), um levantamento de usuários de Prototipagem Rápida no Brasil revelou quais as principais aplicações dos protótipos em prototipagem rápida, (gráfico 4.2):

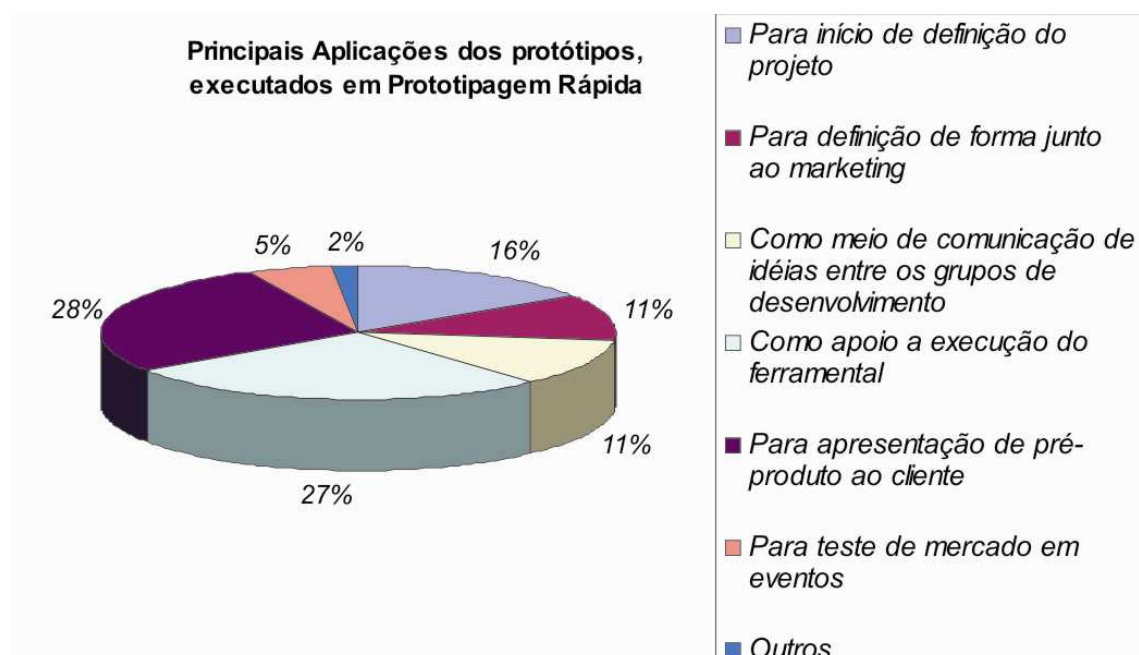


Gráfico 4.2. Principais Aplicações dos Protótipos em Prototipagem Rápida. Fonte: Saura (2003)

Este levantamento no Brasil, representado pelo gráfico 4.2, revela que a construção de protótipo atende com percentuais semelhantes, as percepções mais subjetivas (design) dos produtos em desenvolvimento e as necessidades mais objetivas dos projetos. Enquanto no levantamento representado no gráfico 4.1, com mais países pesquisados, os protótipos são executados de forma a atender principalmente os aspectos mais objetivos do projeto.

A diferenciação destes momentos do processo de desenvolvimento de um produto foi discutida no capítulo 3, item 3.1 Prototipagem Rápida onde justamente estabelecia-se esta diferença de termos entre Design e Projeto.

Outro aspecto levantado por Saura (2003), é a questão da percepção dos protótipos. E também exposto por Campbell (2007). Segundo os autores,

“A percepção espacial de uma peça muitas vezes é de difícil interpretação. Quando apresentada em uma forma “virtual”, seja em desenho bidimensional no papel ou computador, seja na forma tridimensional computacional (CAD), acarreta um considerável tempo para sua total compreensão, pois se iguala a rápida percepção tridimensional tátil que desfrutar no protótipo como se pode comparar... (no gráfico 4.3)” (SAURA, 2003).

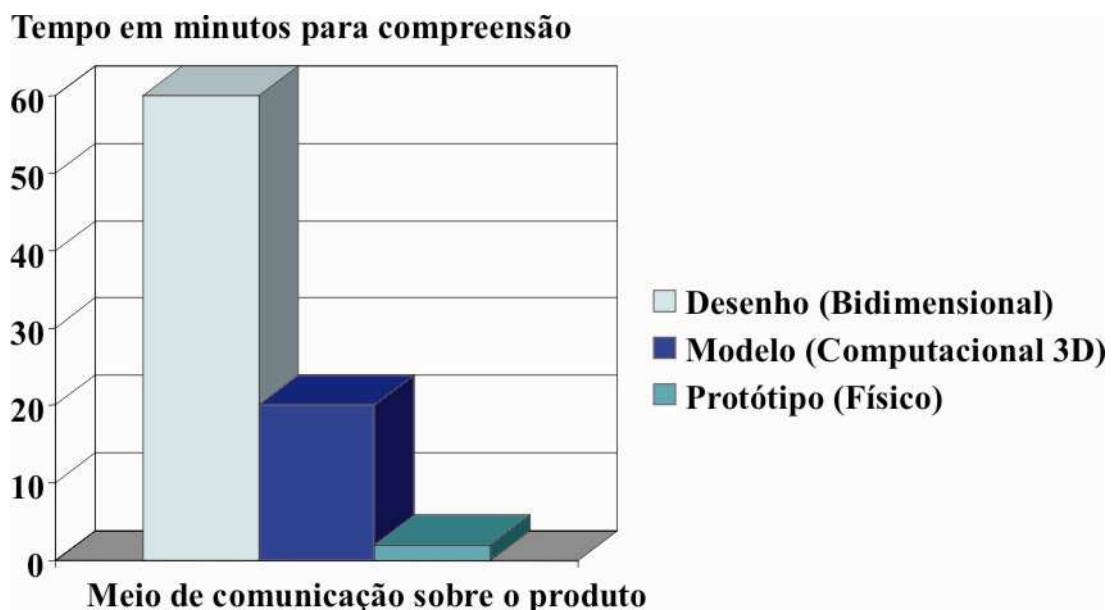


Gráfico 4.3. Percepção dos Protótipos. Fonte: Saura (2003).

Com isso, pode-se imaginar que os protótipos rápidos, cumprindo essas demandas dos usuários, tanto para design quanto para projeto, possam ser construídos por adição de materiais (RP) quanto por remoção de materiais (SRP).

Entretanto, como em cada tecnologia têm-se tipos diferentes de acabamento superficial, estrutura e resistência mecânica do substrato do protótipo e também custos diferentes em cada tecnologia, é importante para a definição de qual tecnologia utilizar a identificação das complexidades geométricas da geometria do produto a ser prototipado (KIM and OH, 2008).

Algumas tecnologias permitem a construção de protótipos totalmente funcionais, enquanto outras têm limitações em seus processos que permitem peças geometricamente bem construídas, mas não funcionais sob o ponto de vista mecânico, apesar de servirem a propósitos não menos importantes, como modelos de observação, testes de montagem e de produção de forma muito satisfatória. É comum as tecnologias de RP serem utilizadas para a construção de protótipos semi-funcionais, já que seus materiais não representam as mesmas propriedades físicas do produto final. Entretanto, ao longo do desenvolvimento do produto a construção de protótipos é exigida várias vezes, assim, a construção de protótipos com mais de um tipo de tecnologia de RP pode ser utilizada de forma a aproveitar aquilo que cada tecnologia pode trazer em benefício do desenvolvimento do produto (FLETCHER, 2003).

O importante é saber exatamente o que se quer analisar comum protótipo. A análise de um encaixe perfeito, uma dobradiça plástica ou a precisão de um furo, ou ainda aspectos como translucidez para passagem de luz e é claro resistência mecânica. São geralmente conseguidos em protótipos diferentes.

4.3 – Identificação das Complexidades Geométricas

Uma geometria complexa sob o ponto de vista de produção industrial, está ligada ao fato de ser possível injetar, fundir, conformar, enfim agir sobre os materiais e replicar a técnica inúmeras vezes esta a peça ou geometria complexa em moldes de injeção, fundição e/ou conformação de polímeros, metais, cerâmicas, etc.

A utilização das tecnologias de prototipagem rápida para produtos que serão produzidos no processo de injeção polimérica, deve levar em consideração geometrias que são possíveis de se injetar e os produtos a serem analisados devem retratar as principais complexidades de um produto

produzido em moldes de injeção de polímeros, devendo ser livres de ângulos negativos de extração do moldes. Ter paredes finas, ou grossas, dobradiças, torres, aletas, enfim detalhes que dificultem a injeção.

Como a experiência comparativa com a tecnologia de prototipagem rápida por deposição de material (RP), exige justamente levar o processo de remoção (SRP) aos mesmos níveis de prototipagem do processo de adição (RP), é importante que sob o ponto de vista de complexidade de geometria, não haja nenhum impedimento de construção de peças complexas. Seria tendencioso analisar um simples cubo ou esfera. Algumas limitações são óbvias, tais como encaixes e superfícies negativas ao ângulo de usinagem das fresas. Porém essas limitações não devem ser por si só excludentes, ou seja, o fato de existirem tais limitações não impede a execução do protótipo por SRP, pois há a possibilidade de se executar tais elementos manualmente, ou ainda, ignorá-los, pois não terão efeito negativo no propósito do protótipo, se este propósito for, por exemplo, de uma análise que não envolva esses pontos específicos, ou ainda de uma análise volumétrica (DVORAK, 2004.)

4.3.1 – Considerações para um *check-list* para definição do uso da prototipagem rápida.

Ao se comparar as características das tecnologias e processos de prototipagem rápida por adição (RP) e prototipagem rápida por remoção (SRP), é necessário compreender quais são as limitações de cada tecnologia e processo. (WHOLERS, T. and GRIMM, T., 2003).

Apesar de não retratarem todas as possibilidades existentes na prototipagem rápida SRP e RP, Wholers e Grimm, apresentam um resumo destas características:

01 – Materiais:

RP: *Limitado;*

Materiais como polímeros, metais, cerâmicas, e compostos já podem ser utilizados. Entretanto ainda são limitados e na maioria dos casos suas propriedades não são as mesmas dos processos de injeção e fundição;

SRP: *Quase ilimitado;*

Praticamente todos os materiais podem ser usinados em centros de usinagem, mas alguns equipamentos de SRP se limitam no que se diz respeito a metais ferrosos;

02 - Tamanho máximo das peças

RP: *600 x 900 x 500mm;*

È importante lembrar que o tamanho da peça tem impacto direto no tempo de execução do protótipo. Maior a peça maior o tempo de execução. E que estas dimensões representam a área de interferência direta do equipamento, pois é possível a colagem de partes dos protótipos;

SRP: Não há como especificar um tamanho de peça, se considerar grandes centros de usinagem e a colagem das partes dos protótipos. Entretanto é necessário citar que os equipamentos destinados para SRP têm a mesma capacidade dos equipamentos de RP. Considerando ainda que a altura das peças (inteiras) a serem trabalhadas, deve estar sujeitas ao comprimento útil das ferramentas de usinagem;

03 - Complexidade das peças

RP: *Ilimitado;*

Esse é o grande benefício da tecnologia RP, a produção de peças complexas rapidamente;

SRP: *Limitado;*

Na medida em que a complexidade das peças aumenta, cresce o número de operações de troca de ferramentas, além haver dificuldade na usinagem de cantos internos retos, detalhes profundos e ângulos negativos à usinagem;

04 - Qualidade em detalhes

RP: *Vários;*

Alguns detalhamentos só são possíveis em RP, tais como pequenas dobradiças, aletas, pequenas espessuras, encaixes negativos ao ângulo de usinagem. Entretanto, detalhamentos superficiais como logos, pequenos ressaltos e encaixes externos são prejudicados pela construção em camadas das tecnologias;

SRP: *Vários;*

Alguns detalhes internos podem ser prejudicados pelos raios das ferramentas, assim como os encaixes internos e externos. Entretanto, com ferramentas pequenas é possível minimizar esses efeitos, mas aumentam o tempo de execução. Mas na maioria das peças detalhes como chanfros, arredondamentos, partes afiadas, vão ter um detalhamento apurado.

05 - Precisão

RP: *0,125 a 0,75mm;*

SRP: *0,0125 a 0,125mm;*

A precisão entre o projeto tridimensional e o protótipo construído está relacionado com o tipo do equipamento e a integração do software CAD/CAM utilizado na execução dos objetos, os valores apresentados são referências das sobreposições das camadas de construção no caso da tecnologia RP e das diversas variáveis

existentes na tecnologias SRP, como fresas ou a geração dos códigos numéricos das superfícies a serem usinadas;

06 - Repetição

RP: *Baixo;*

Construir uma peça em RP é sempre iniciar o processo novamente, além disso, as tecnologias de RP são muito sensíveis as condições de temperatura e umidade;

SRP: *Alto;*

Uma vez estabelecidos os *toolpath* (caminhos de usinagem) para as ferramentas e o *set-up* de peças o processo pode ser iniciado repetidamente. Entretanto o fator humano e as questões de condições de temperatura e umidade podem afetar alguns materiais e a precisão do *set-up*;

07 - Acabamento superficial

RP: *2,5 a 15 microns;*

Independente do equipamento a superfície será rugosa, em função do processo de construção em camadas.

Um acabamento superficial melhor vai exigir trabalho extra o que pode gerar alguma deformação na peça reduzindo sua precisão e aumentar seu custo;

SRP: *0,5 a 5 microns;*

O acabamento superficial da SRP é ideal para protótipos e ferramentas. E assim como para RP qualquer operação extra, pode gerar alguma deformação na peça reduzindo sua precisão e aumentar seu custo;

08 - Confiabilidade

RP: *Alta;*

A tecnologia de RP conta com processos novos a cada ano, mas com processos estabelecidos e pesquisados a mais de quinze anos, que validam a sua confiabilidade. (WHOLERS, 2.005).

SRP: *Alta;*

Trinta anos de pesquisa e desenvolvimento, e um número significativamente maior de fabricantes faz da tecnologia CNC ser considerada madura e confiável. (WHOLERS, 2.005).

09 - Operador

RP: *Mínimo;*

Exceto pelos trabalhos de pós-acabamento, praticamente não é necessário operador nos equipamentos de RP;

SRP: *Moderado;*

Os *softwares CAM* estão mais amigáveis, mas não eliminaram a intervenção humana nos *CNCs*, é necessário um operador com alguma experiência para trabalhar no equipamento;

10 – Mão-de-obra especializada

RP: *Mínimo;*

Alguns equipamentos são como impressoras de computadores pessoais, basta dar o comando de impressão e esperar o objeto. Mão-de-obra especializada não é requerida, um simples treinamento já qualifica os usuários dos equipamentos;

SRP: *Moderado;*

Enquanto nos centros de usinagem exigem um grande conhecimento em usinagem, criatividade e habilidade de resolver

problemas de seus operadores, nos equipamento de SRP esse conhecimento já não é mais tão necessário, graças aos novos conceitos de *desktops* disponibilizados ao mercado. Entretanto, para se extrair o máximo de possibilidades dos equipamentos algum conhecimento maior do aquele dos equipamentos de RP é necessário, pois na medida em que as tecnologias de SRP oferecem o conceito *plug-and-play* em seus equipamentos, limitam em algum momento as possibilidades de uso dos mesmos;

11 – Tempo

RP: *Curto a moderado;*

Desde que o equipamento esteja em condições praticamente não há *set-up* de máquina, basta organizar o CAM do equipamento, enviar as informações a ele e retirar a peça algum tempo depois. Porém isso não garante que este tempo seja curto, nem sempre a tecnologia RP é a mais rápida para execução dos protótipos;

SRP: *Moderado;*

Usinagem em CNC, sempre irá requerer *toolpaths*, *set-ups*, e alguma supervisão, isso demanda tempo e geralmente maior que o tempo da tecnologia de RP. Entretanto, nos equipamentos destinados à SRP esse tempo já está reduzido e supera muitas vezes o tempo da RP, sempre quando as peças são menos complexas.

A seleção da melhor tecnologia, geralmente vem do tempo disponível para execução do protótipo, mas principalmente para que este protótipo será utilizado e o custo que ele irá significar no desenvolvimento do produto. Conhecendo-se os fatores relacionados acima e as questões de utilização, tempo, qualidade e custo definir qual tecnologia utilizar para se fazer protótipos vai muito além do que opinião. Requer o conhecimento das tecnologias e tomada de decisão (WOHLERS AND GRIMM, 2003).

4.3.2 – Planilha de *Check-list*

A tabela 4.1 é uma planilha de *Check-list* que pode ser utilizada para auxiliar na definição de qual tecnologia de prototipagem rápida utilizar e é resultado da percepção das razões pelas quais os protótipos são construídos, conforme pode ser visto nos gráficos 4.2 e 4.3.

Requisitos / Relevância	Muito Relevante	Relevante	Pouco Relevante	Observações
Para que o protótipo será construído?				
Material a ser simulado				
Tamanho da peça protótipo				
Verba disponível para o protótipo				
Tempo disponível para o protótipo				
Precisão desejada no protótipo				
Detalhes complexos a serem detalhados no protótipo				
Acabamento superficial				

Tabela 4.1. Planilha de *Check-list*.

4.3.3 – Arquivos digitais para prototipagem rápida

O modelo tridimensional gerado em CAD precisa passar por um processo de “*fatiamiento*”, para que possa ser produzido pelos equipamentos da tecnologia de prototipagem rápida por adição de materiais (RP) camada a camada. Sendo assim, um formato de arquivo digital é necessário para a construção das instruções que levarão a construção por camada a camada do protótipo pelo equipamento. O formato mais utilizado pelos equipamentos de RP é o Formato STL (*STereoLithography*), que foi utilizado pela primeira vez em 1987 pela *3D Systems* para converter os modelos tridimensionais para uso na *StereoLithography Apparatus* (SLA). O formato de arquivo STL é uma representação poliedral do modelo com faces triangulares, que usa um processo conhecido como “*tessellation*” o qual gera triângulos para formar o modelo CAD. É um arquivo simples e independe da complexidade da geometria para gerar o modelo CAD e gera grande quantidade de informação redundante, na medida em que duplica várias bordas das faces triangulares. Porém é um arquivo confiável e aceito por praticamente todos os equipamentos de RP, inclusive a maioria dos equipamentos de SRP, apesar desta tecnologia utilizar-se de vários métodos de obtenção de informação para a construção dos protótipos, independentemente do formato de arquivo STL (WU, and CHEUNG, , 2006).

Outro formato de arquivo aceito por muitos dos equipamentos de RP e SRP é o formato de arquivo IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*), padrão utilizado para troca de informação entre os sistemas CAD comerciais. Este formato foi definido como um padrão Americano (*American National Standard*) para troca de informações gráfica em 1.981. O formato de arquivo representa precisamente os modelos CAD e por ser o padrão mais aceito entre os sistemas CAD/CAM, representa diversas vantagens em seu uso para a troca de modelos 3D na prototipagem rápida. (JACOB, 1999).

Vários outros formatos arquivo são utilizados pelos equipamentos de RP e SRP, entre eles os formatos RP e X_T, mas os arquivos STL e suas extensões são ainda os mais utilizados para troca da informação tridimensional até os softwares CAM de prototipagem rápida.

4.3.4 – Processo Básico para preparação dos Protótipos

O processo para preparação de protótipos através da prototipagem rápida segue a seqüência a seguir:

- 01- Criação do Modelo CAD;
- 02- Definição da Complexidade da Geometria;
- 03- Definição da Tecnologia Ideal para o Protótipo – via *check-list*;
- 04- Geração dos arquivos para prototipagem, de diversas extensões, de acordo com o equipamento a se utilizar;
- 05- SET UP do equipamento;
- 06- Construção do Protótipo;
- 07- Limpeza e acabamento do Protótipo.

Com esta seqüência, preparou-se o estudo de caso apresentado nesta dissertação.

Capítulo 5 - MODELO METODOLÓGICO PROPOSTO PARA DETERMINAÇÃO DO MELHOR MÉTODO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA.

Como o objetivo dessa pesquisa é identificar como os designers de produto, em um projeto de um produto industrial podem definir qual a melhor tecnologia de prototipagem rápida (RP ou SRP), através da integração de sistema CAD/CAM, reduzindo tempo do ciclo de desenvolvimento e aumentando a qualidade de design e pré-produção deste produto, a figura 5.1 apresenta esta proposta metodológica que é baseado em quatro etapas:

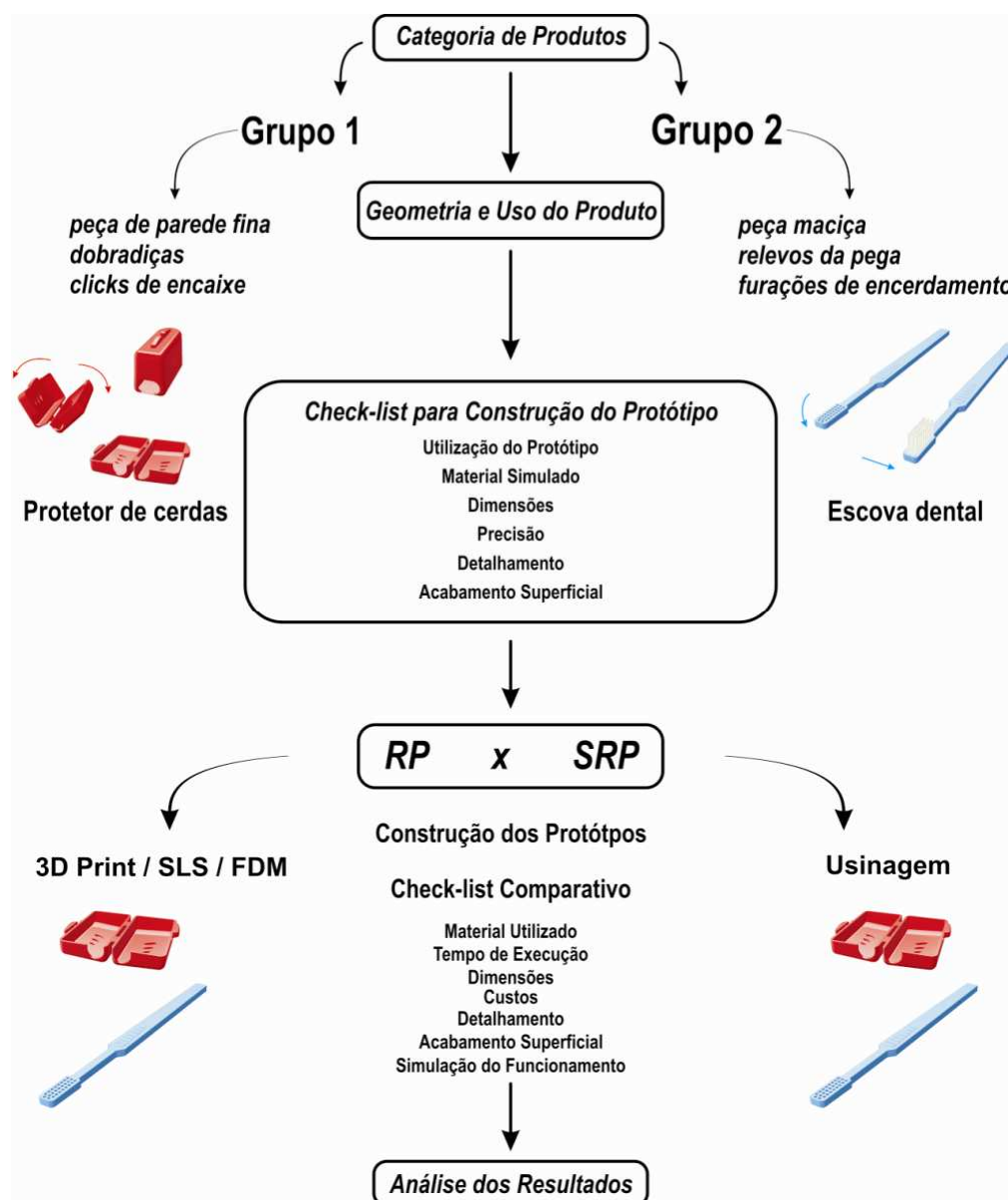


Figura 5.1. Modelo da pesquisa.

5.1 – Definição da categoria, geometria e uso dos produtos.

Foram definidos dois grupos de produtos a serem prototipados, tendo em vista dois tipos distintos de características e restrições. O “grupo 1” é caracterizados por peças com parede fina e outros elementos complexos como dobradiças e clicks de encaixe, este grupo é representado por um protetor de cerdas de escova dental . O “grupo 2” tem corpo maciço, relevos de pega e furações para encerdamento e é representado por uma escova dental.

5.2 – Análise do produto – *check-list* dos produtos.

Foram analisados os aspectos dimensionais dos produtos, além da aplicação de um *check-list* que definiu quais aspectos deveriam ser analisados nos protótipos, com base nas características dos produtos referenciais utilizados. A composição do *check-list* desenvolvido visava definir qual a melhor tecnologia e processo de prototipagem rápida, deve ser aplicada a cada protótipo buscado.

1- Para que o protótipo será construído; Um protótipo que será exaustivamente testado é diferente de um protótipo que receberá avaliação estética. As tecnologias e processos de prototipagem rápida têm acabamentos superficiais diferentes;

2- Material; Cada tecnologia de RP conta com uma gama específica de materiais que pode utilizar como substrato de construção do protótipo, mesmo a SRP que pode utilizar uma infinidade de materiais, conta com o problema de disponibilidade de materiais poliméricos para usinagem. O Material a ser utilizado indicará também a resistência mecânica do protótipo além de definir propriedades tais como impermeabilidade, resistência química e temperatura de trabalho do protótipo.

3- Tamanho das peças; Cada equipamento tem área de trabalho definida, portanto o tamanho da geometria é ponto importante para a definição de qual tecnologia utilizar e como utilizá-la. Algumas tecnologias têm problemas com peças grandes ou pequenas demais, mesmo sendo possível

colar diversas partes dos protótipos é importante não prejudicar o propósito do protótipo. Além disso, o tamanho das peças tem impacto direto no tempo de execução do protótipo, assim como no seu custo.

4- Verba disponível para Execução do protótipo: Em diversas fases dos projetos de produtos, a construção de modelos físicos e protótipos são necessários. A complexidade do tipo de modelo ou protótipo representa evidentemente custos distintos em suas construções. No planejamento dos projetos dos produtos, são destinadas verbas que devem ser observadas e por isso a questão do montante disponível para determinada fase do projeto representa um elemento a ser considerado no momento da decisão de qual tecnologia de prototipagem utilizar.

5- Verba disponível para Execução do protótipo: Da mesma forma que as verbas disponíveis são determinantes no tipo de tecnologia de prototipagem rápida a ser utilizada, o tempo disponível para o cumprimento das distintas fases dos projetos dos produtos, deve ser considerado na definição do tipo de tecnologia a se utilizar.

6- Precisão; Espessura de paredes das geometrias, detalhes e ângulos internos iguais ou menores de 90 graus. Algumas tecnologias e processos têm limitações de construção de espessuras e de pequenos detalhes, mesmo assim algumas dessas espessuras podem ser ignoradas sem prejudicar o fim do protótipo;

7- Detalhes complexos; Encaixes com ângulos negativos de extração em relação ao processo de injeção de polímeros e ângulos internos iguais ou menores de 90 graus. Várias geometrias contam com esses detalhes, apesar de na injeção de polímeros haverem soluções de posições que permitam a formação de tais ângulos, que configuram alguns encaixes, nem todas as tecnologias contam com esta possibilidade;

8- **Acabamento superficial**; Em caso de um protótipo de apresentação estética, o acabamento superficial é importantíssimo, pois é este que definirá o futuro do projeto.

Cada item do *check-list* deve ser marcado com as seguintes variações:

- a. **Muito Relevante**; Classificação que indica alta prioridade para o item;
- b. **Relevante**; Classificação que indica que a tecnologia deve oferecer qualidade no item indicado;
- c. **Pouco Relevante**; Classificação que indica que não é essencial o item para a fase do projeto em que o protótipo está sendo solicitado;
- d. **Observações**. Espaço para demarcar certas especificações do protótipo solicitado;

Com esse *check-list*, com o conhecimento das tecnologias e com as informações obtidas na prática da prototipagem rápida é possível definir quais tecnologias e processos seriam ideais para execução de protótipos em diversas geometrias de produto. Ao se marcar as relevâncias dos itens, os usuários do *check-list*, devem ter conhecimento das vantagens e desvantagens das tecnologias que se tem disponível para o protótipo.

5.3 – Definição das tecnologias de prototipagem rápida e construção dos protótipos.

Foram definidos os tipos de prototipagem rápida que foram utilizadas, tanto de adição quanto de remoção de materiais, como se pode ver no capítulo 6, item 6.2.

Foram construídos os protótipos e apontados os resultados num *check-list* comparativo para análise posterior, conforme item 6.3 e 6.4 do capítulo 6.

5.4 – Avaliação dos Resultados.

Foram analisadas e avaliadas as informações geradas pela construção dos protótipos levando-se em conta os parâmetros exigidos nos *check-lists* dos produtos, conforme itens 6.5 e 6.6 do capítulo 6.

Capítulo 6 – PROTÓTIPOS PARA AVALIAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO ATRAVÉS DE ESTUDOS DE CASO.

Este capítulo apresenta todo o processo de desenvolvimento dos protótipos, de acordo com o método proposto no capítulo 5.

6.1 – Definição dos produtos para construção dos protótipos dos estudos de caso

Para a avaliação comparativa dos processos de prototipagem rápida foram definidos dois produtos já desenvolvidos e que já passaram pelos processos de prototipagem, produzidos e disponibilizados no mercado. São um protetor de cerdas para escovas dentais e uma escova dental. Esses produtos passaram pelo processo de criação, modelação tridimensional, prototipados e analisados. Após esse processo, foram encaminhados para empresas de ferramentaria, que produziram os seus moldes de injeção plástica e por fim entraram em produção e são vendidos há no mínimo 05 anos.

A escolha destes produtos tem por base a possibilidade de comparação entre os protótipos construídos e os produtos finais. Cada produto tem seu grau de complexidade diferente entre si e possuem geometrias distintas entre função, massa e medidas. A utilização do protetor de cerdas foi definida justamente pelas suas funções, forma e peculiaridades de sua produção e principalmente por ser caracterizado por suas paredes finas. A escova dental foi definida pelas suas funções e características do corpo maciço. Como os dois produtos são produzidos em materiais poliméricos distintos, possuem mecanismos específicos de funcionamento e características de massas diferentes.

6.1.1 – Grupo 1 - Protetor de Cerdas de parede fina – Caso1

O protetor de cerdas (figura 6.1) tem a função de proteger as cerdas de uma escova dental de contato com superfícies sujas e de pó. Sua espessura média é de 1,00 mm e é injetado em Polipropileno *Random*, para garantir a flexibilidade de duas dobradiças plásticas de 0,50 mm de espessura. Além disso, possui um sistema de fechamento com clicks, com 1,50 mm de diâmetro, que permite ao protetor de cerdas ser fechado em torno das cerdas de escovas dentais. Estes clicks e dobradiças devem durar e permitir a abertura e fechamento do protetor por pelo menos 03 meses de uso diário, conforme recomendação do fabricante (figura 6.1).

A dificuldade na prototipagem deste produto encontra-se na acuidade de sua espessura, tanto na casca do produto, quanto na dobradiça plástica. Os clicks de fechamento formam, em seu furo de fechamento, um ângulo negativo a extração do molde de injeção e por consequência na construção dos protótipos. Pode-se imaginar a dificuldade de prototipagem SRP (desbaste ou remoção), quando a usinagem for executar este posto negativo específico da peça, pois além de negativo o furo semicircular tem 1,50 mm de diâmetro. Estas pequenas medidas, dos furos dos *clicks*, bem como nas dobradiças plásticas, representam dificuldades de execução em alguns processos de RP (deposição ou adição), já que para algumas tecnologias de RP essas medidas não conseguem serem representadas. (figura 6.3).

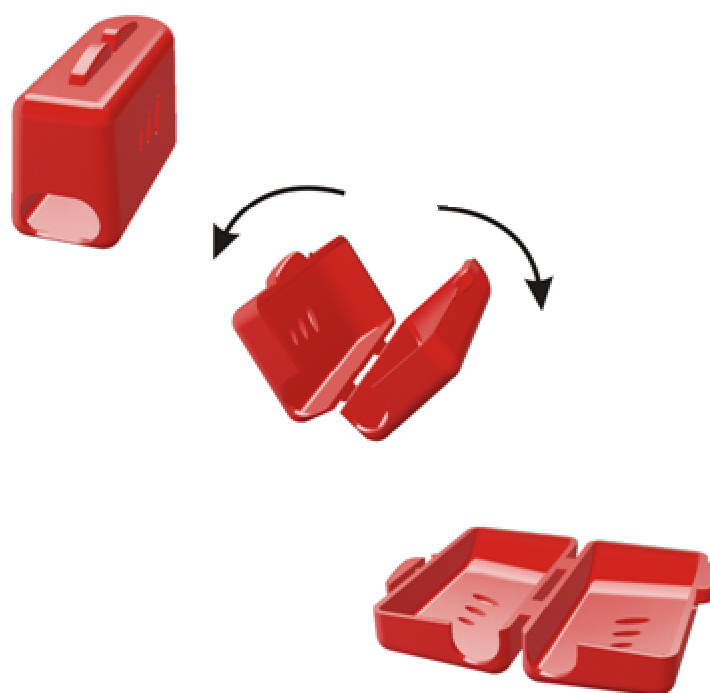


Figura 6.1. Representação do protetor de cerdas.

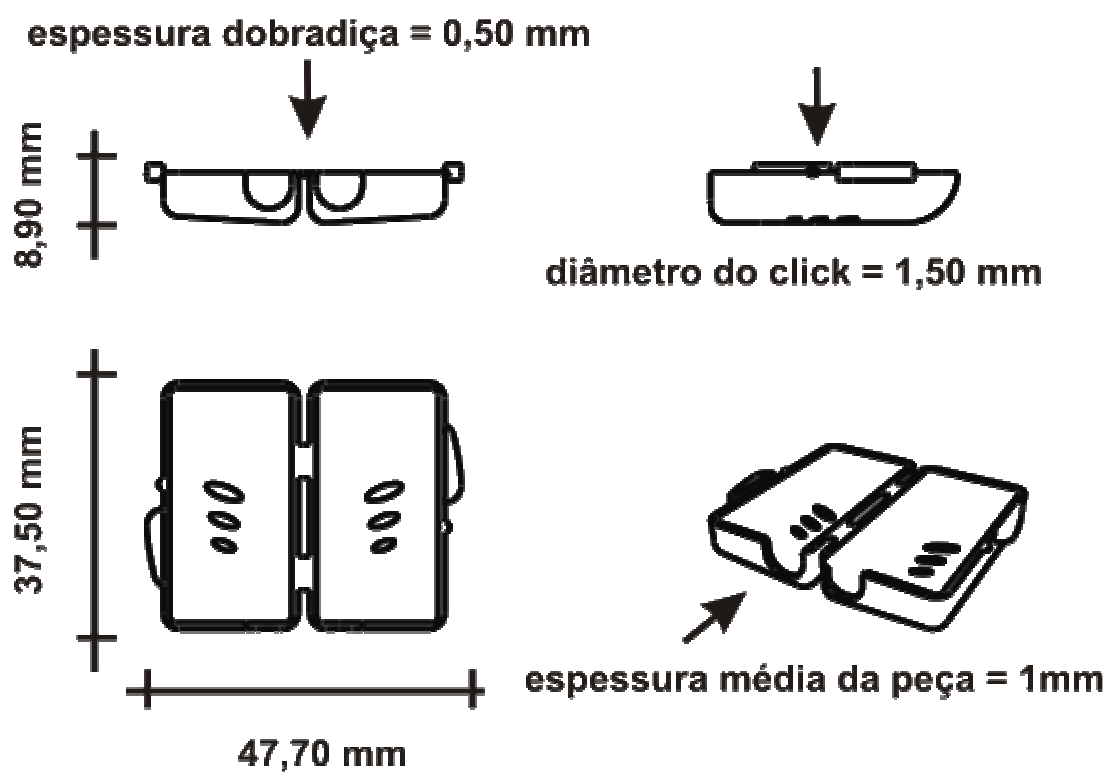


Figura 6.2. Vistas do protetor de cerdas.

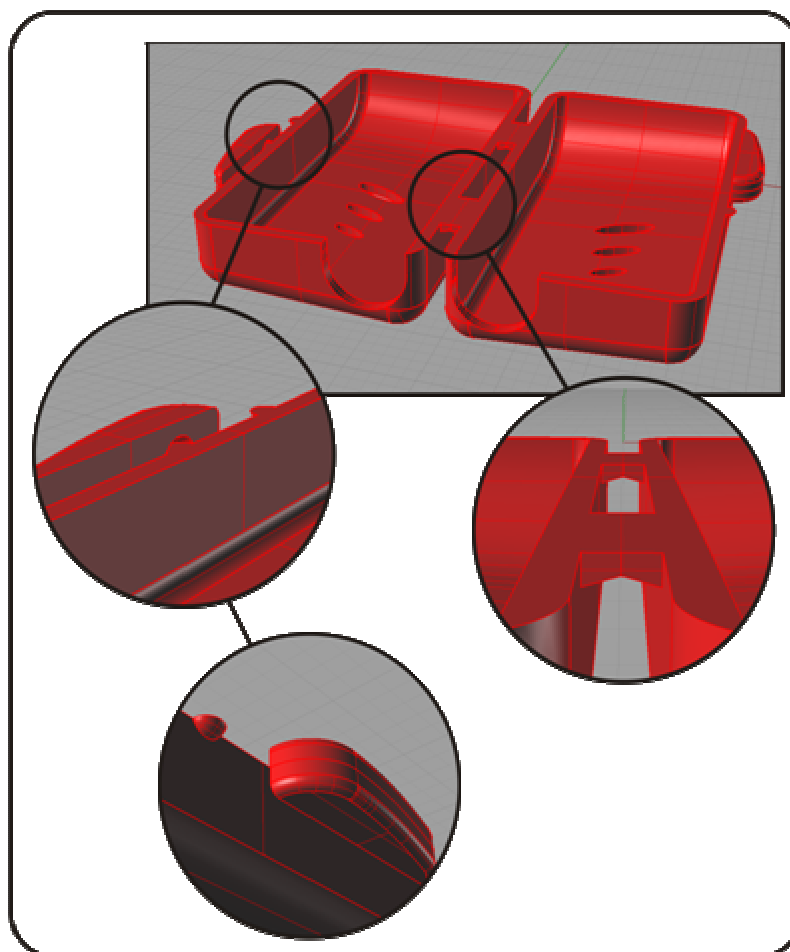


Figura 6.3. Modelo tridimensional gerado por CAD do protetor de cerdas.

6.1.2 – Grupo 2 - Escova Dental de corpo maciço – Caso 2

A função da escova dental (figura 6.3) é evidentemente para escovação dos dentes, com a forma reta, segue as recomendações da maioria dos dentistas. Foi projetada para suportar as pressões existentes no ato da escovação. Sua espessura média é de 5,50 mm e por exigência de produção pode ser injetada em Politereftalato de Etila (PET), ou em Polipropileno Random (PP Random) ou ainda em Polietileno de Alta Densidade (PEAD), para garantir a flexibilidade na escovação, mas também garantir a manutenção de sua forma reta durante a escovação Além disso, possui detalhe de pega com relevos de 1,00 mm de diâmetro, permitindo que a escova não escorregue durante seu uso. Possui 28 furos de 1,80 mm de diâmetro e 2,50 mm de profundidade, que são utilizados para serem encravadas as cerdas de Poliamida ou Nylon. Através de âncoras metálicas, as cerdas são colocadas

uma a uma em sistema de encravamento automático, em menos de 2 segundos por escova. (figura 6.4).

A dificuldade na prototipagem deste produto encontra-se na acuidade de sua espessura, na formação dos relevos de pega e principalmente na manutenção dos diâmetros dos furos de encerdamento, para o produto seja compatível com o sistema de encravamento das cerdas. Tanto na prototipagem SRP (desbaste ou remoção) quanto na RP (deposição ou adição), o desafio se dá tanto na usinagem e ou formação de camadas corretas dos diâmetros dos furos de encravamento das cerdas, quanto na formação dos relevos de pega.

Numa escova dental, que será utilizada dentro da boca, local de extrema sensibilidade tátil, é fundamental que o produto tenha a superfície mais lisa e uniforme possível, o desafio para ambos os processos de prototipagem rápida, SRP e RP, é construir protótipos que representem a suavidade necessária ao uso do produto, bem como a manutenção dimensional para o encravamento das cerdas. (figura 6.6).

Outro detalhe a ser notado, é a especificação de flexibilidade dos materiais protipados e a manutenção do perfil reto da geometria durante o uso da escova dental. As tecnologias de prototipagem rápida, além das acuidades dimensionais devem representar os materiais das escovas produzidas. (figura 6.6).

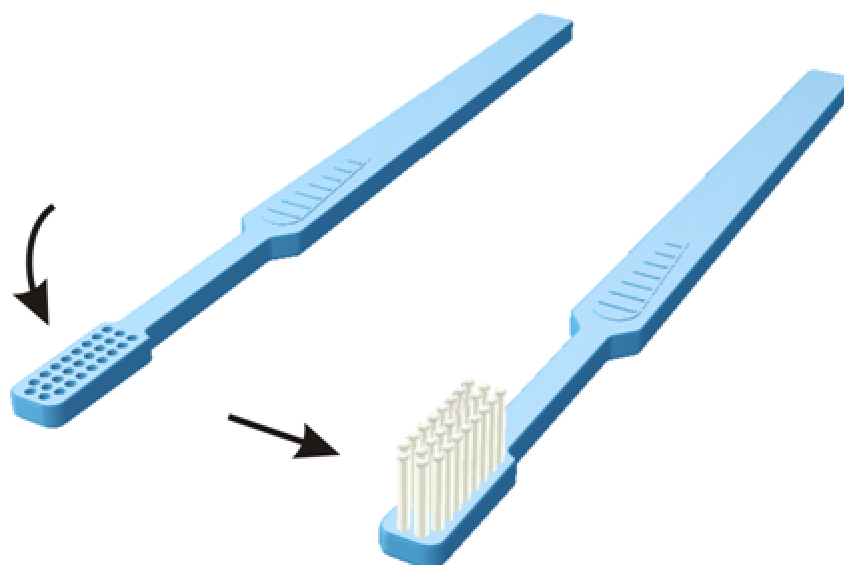


Figura 6.4. Representação da escova dental

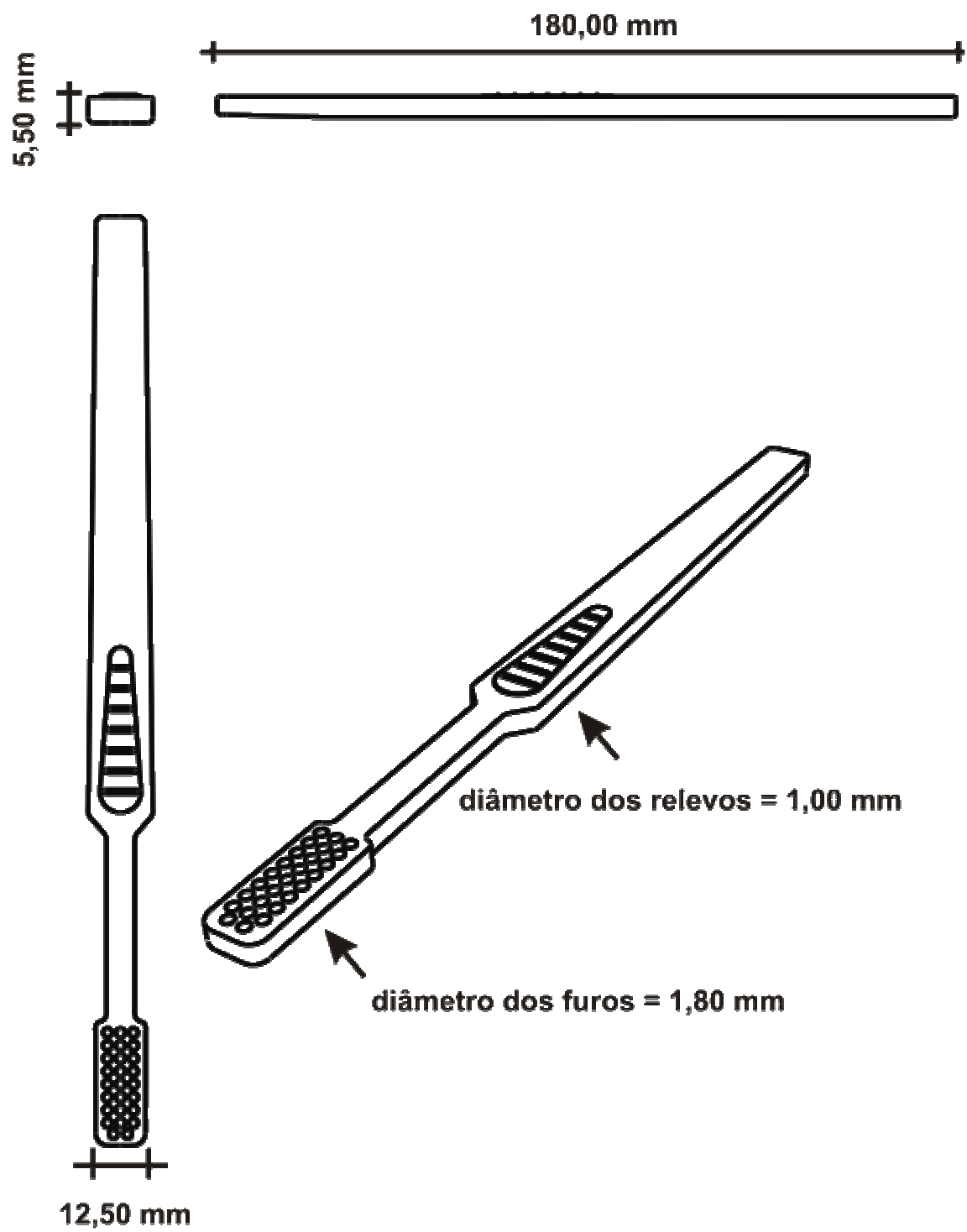


Figura 6.5. Vistas da escova dental.

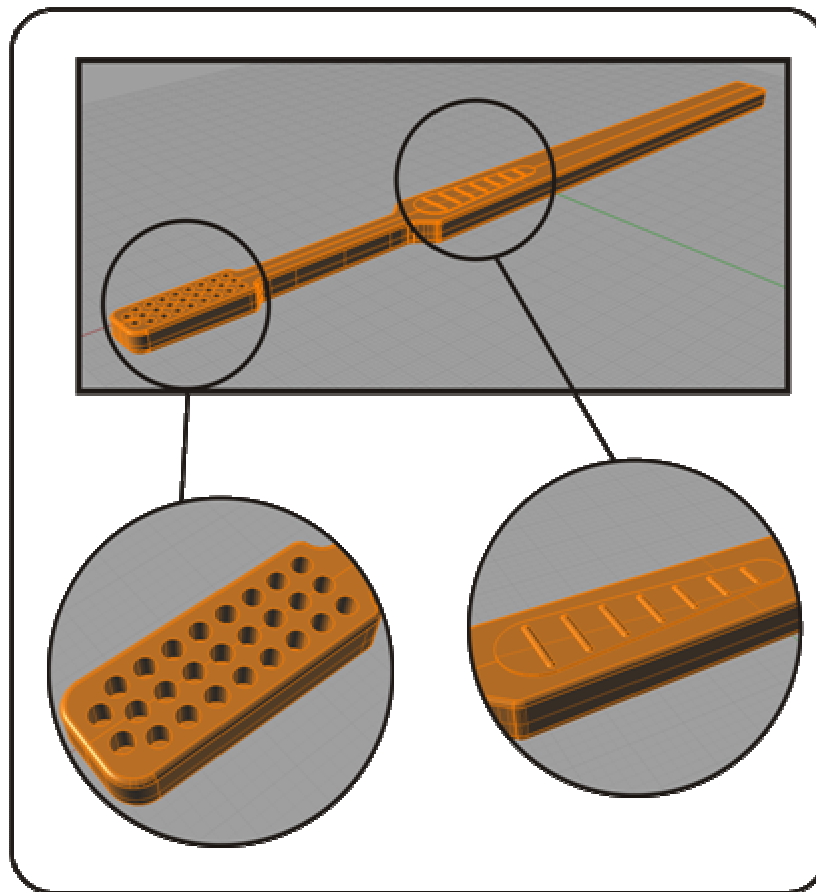


Figura 6.6. Modelo tridimensional gerado por CAD da escova dental.

6.2 – Definição das tecnologias utilizadas na construção dos protótipos dos estudos de caso

O ideal em uma comparação entre as tecnologias de prototipagem rápida, seria utilizar todas as tecnologias e processos disponíveis no mercado ou no universo científico. Entretanto, na prática do trabalho, encontrou-se apenas alguns interessados no trabalho que disponibilizaram seus dados e equipamentos para que a comparação fosse feita.

O Instituto de Pesquisa Renato Archer, disponibilizou os equipamentos de RP (tecnologia de deposição ou adição de material por camada) que dispunha, ou seja, os processos de FDM - *Fused Deposition Modeling*, SLS - Sinterização a Laser Seletivo e 3DPrint e apesar de possuir e disponibilizar um equipamento de SRP (tecnologia de desbaste ou remoção de material por camada) o modelo MDX-20 da Roland DG, foi optado um equipamento maior e

de melhor desempenho do mesmo fabricante o modelo MDX-500 da Roland DG de propriedade e uso da Megabox Design e Soluções.

Portanto em função do exposto, foi feito todo o trabalho de construção e comparação das tecnologias de prototipagem rápida, com três diferentes processos da tecnologia de RP (deposição ou adição de materiais por camada), FDM, SLS e 3DPrint e um processo de SRP (desbaste ou remoção de materiais por camada).

6.3 – *Check-List* dos Produtos dos estudos de caso

Este *check-list* é a representação prática do modelo de *check-list* apresentado conceitualmente no item 5.2 do capítulo 5.

6.3.1 – *Check-List* do Protetor de Cerdas

Requisitos / Relevância	Muito Relevante	Relevante	Pouco Relevante	Observações
Para que o protótipo será construído?	X			Teste de funcionamento
Material a ser simulado	X			Simulação Polipropileno
Tamanho da peça protótipo		X		47,70 x 37,50 x 8,90 mm
Verba disponível para o protótipo		X		R\$ 500,00
Tempo disponível para o protótipo		X		07 dias
Precisão desejada no protótipo	X			Detalhes precisos
Detalhes complexos detalhados no protótipo	X			Clicks e dobradiças
Acabamento superficial			X	Simulação da Injeção

Tabela 6.1. Planilha de *Check-list* do protetor de cerdas

A tabela 6.1 é o *check-list* do protetor de cerdas, onde o grau de relevância dos itens pré-estabelecidos conceitualmente no item 5.2 do capítulo 5, são definidos, e observados os elementos a serem considerados importantes.

6.3.2 – *Check-List* da Escova Dental

Requisitos / Relevância	Muito Relevante	Relevante	Pouco Relevante	Observações
Para que o protótipo será construído?	X			Teste de funcionamento
Material a ser simulado	X			Simulação Politereftalato de etila (PET)
Tamanho da peça protótipo	X			180,00 x 12,50 x 8,90 mm
Verba disponível para o protótipo		X		R\$ 500,00
Tempo disponível para o protótipo		X		07 dias
Precisão desejada no protótipo	X			Furos precisos
Detalhes complexos detalhados no protótipo			X	isento
Acabamento superficial			X	Acabamento liso

Tabela 6.2. Planilha de *Check-list* da escova dental

A tabela 6.2 é o *check-list* da escova dental, onde observa-se os elementos a serem considerados e estabelecem-se os graus de relevância dos itens pré-estabelecidos conceitualmente no item 5.2 do capítulo 5, da mesma forma como foi feito com o protetor de cerdas.

6.4 – Construção dos Protótipos

Foram construídos os protótipos tanto em RP quanto SRP de uma escova dental e um protetor de cerdas, previamente definidos a fim de promover uma comparação entre as tecnologias de prototipagem e entre as tecnologias e o produto final, atendendo assim a proposta inicial da pesquisa.

6.4.1 – Protótipos Construídos por RP - deposição / adição de Material.

A proposta deste trabalho pedia a construção dos protótipos em RP nos processos de FDM, SLS e 3DPrint. Portanto, as imagens a seguir retratam a construção dos protótipos com o fim de comparação entre eles de acordo com o *check-list* pré-estabelecido. Os materiais utilizados nos processos de prototipagem RP, são os materiais disponíveis no fornecedor, ou seja, PA (Poliamida) para SLS, ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) para a FDM e Gesso com aglutinante e cianoacrilato para 3DPrint.

A figura 6.7, representa a construção do protótipo do protetor de cerdas em FDM, apresentada no capítulo 3, item 3.1.1.5 e a figura 6.8 representa os detalhes do protótipo construído.

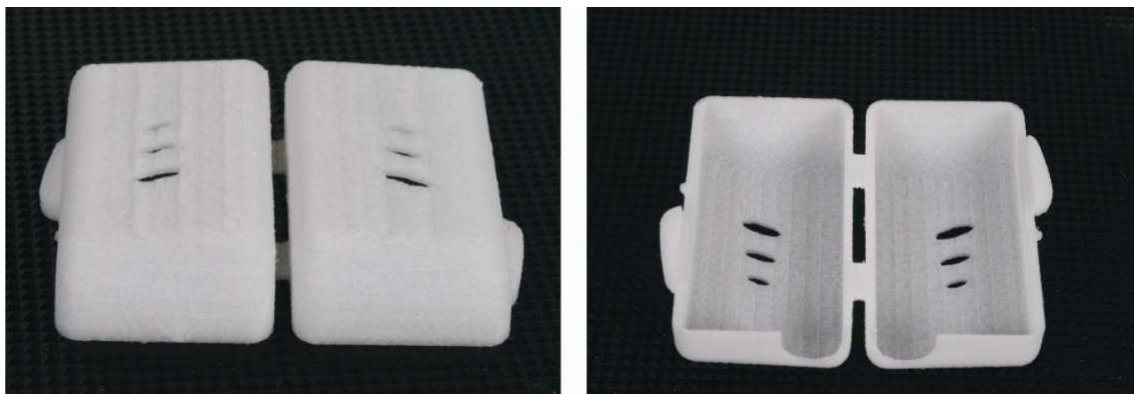


Figura 6.7. Protótipo em FDM do protetor de cerdas. Imagem externa e interna.

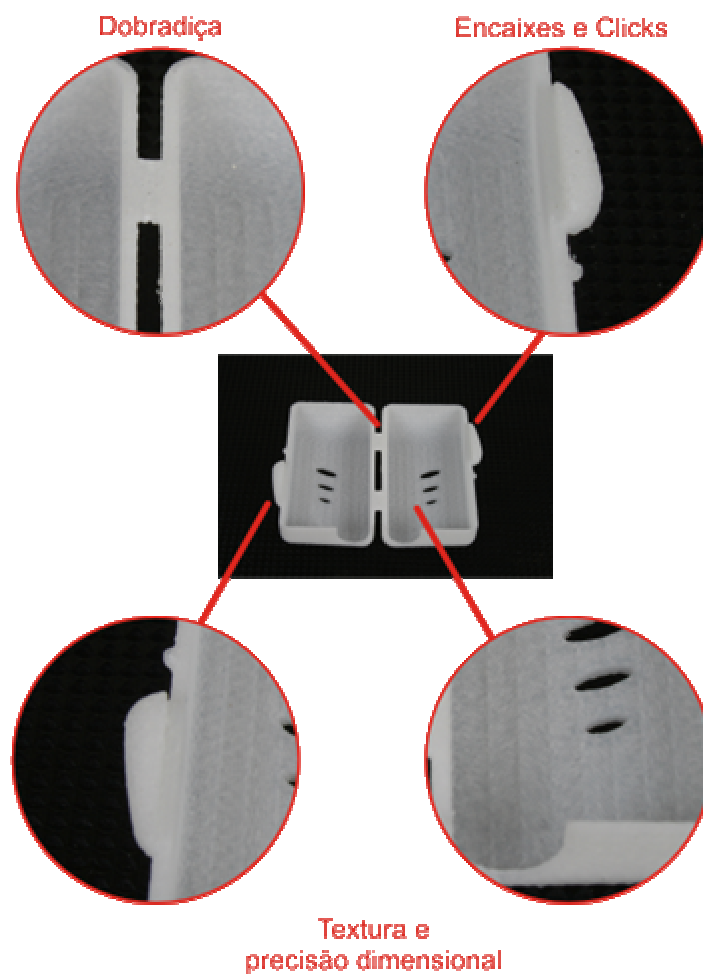


Figura 6.8. Protótipo em FDM do protetor de cerdas. Detalhes.

A figura 6.9, mostra o protótipo da escova dental construído em FDM, processo de RP apresentado no capítulo 3, item 3.1.1.5 e a figura 6.10 representa os detalhes do protótipo da escova dental construído.



Figura 6.9. Protótipo em FDM da escova dental.

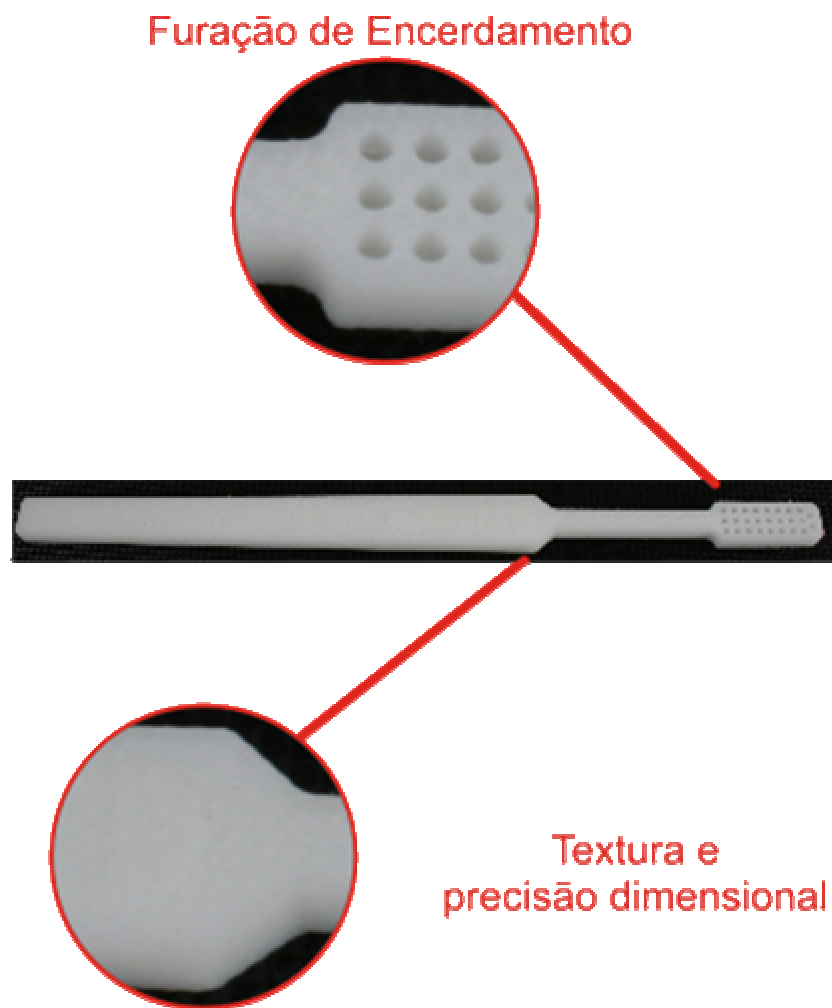


Figura 6.10. Protótipo em FDM da escova dental. Detalhes.

Na figura 6.11, pode-se ver o protótipo do protetor de cerdas construído em SLS, processo de RP apresentado no capítulo 3, item 3.1.1.2 e a figura 6.12 mostra seu detalhamento.

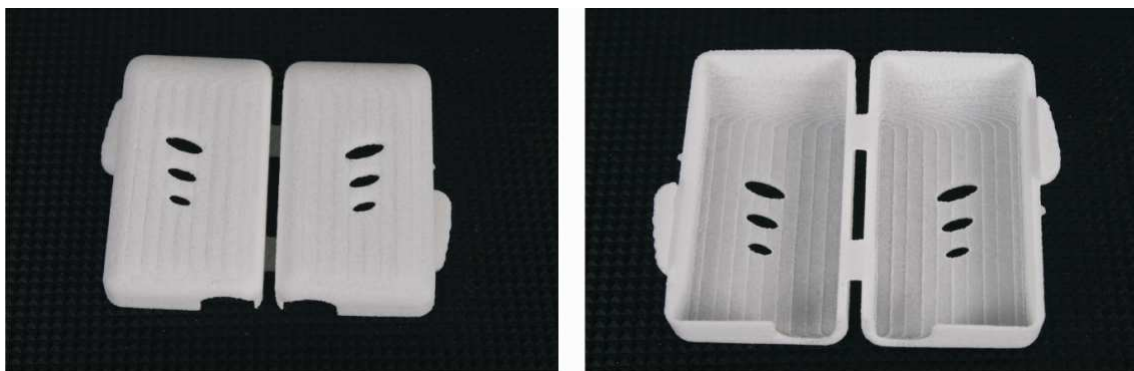


Figura 6.11. Protótipo em SLS do protetor de cerdas. Imagem externa e interna.

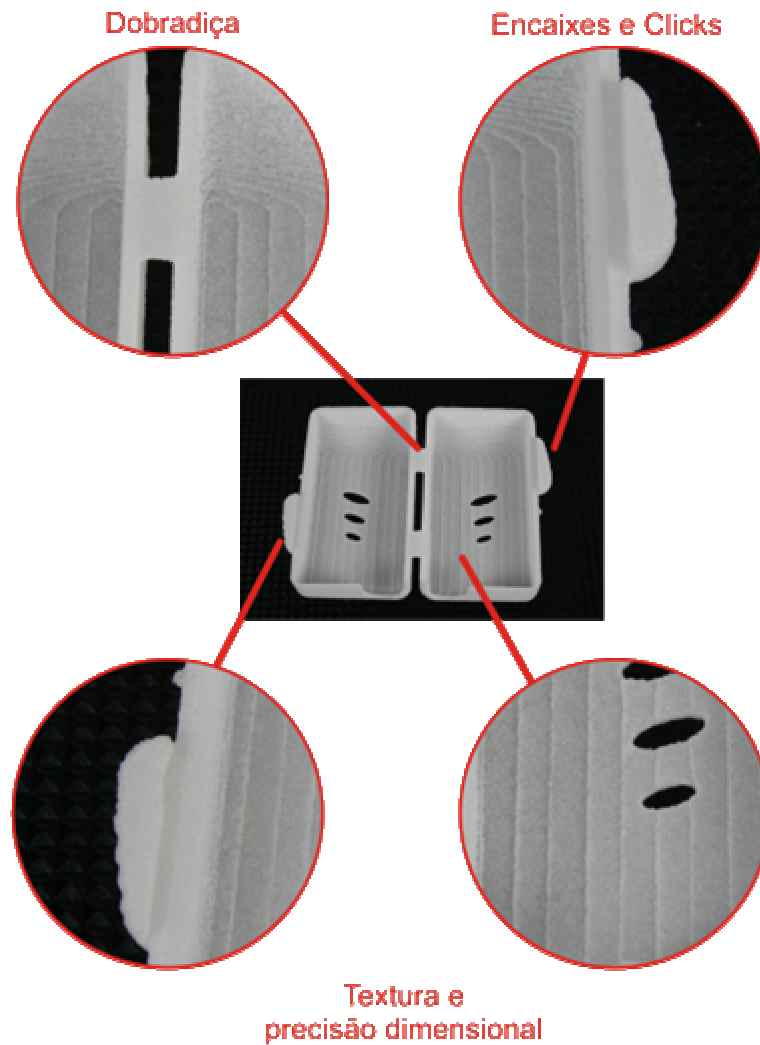


Figura 6.12. Protótipo em SLS do protetor de cerdas. Detalhes.

Na figura 6.13, tem-se a imagem do protótipo da escova dental construído em SLS, processo de RP apresentado no capítulo 3, item 3.1.1.2 e a figura 6.14 representa o detalhamento do protótipo.



Figura 6.13. Protótipo em SLS da escova dental.

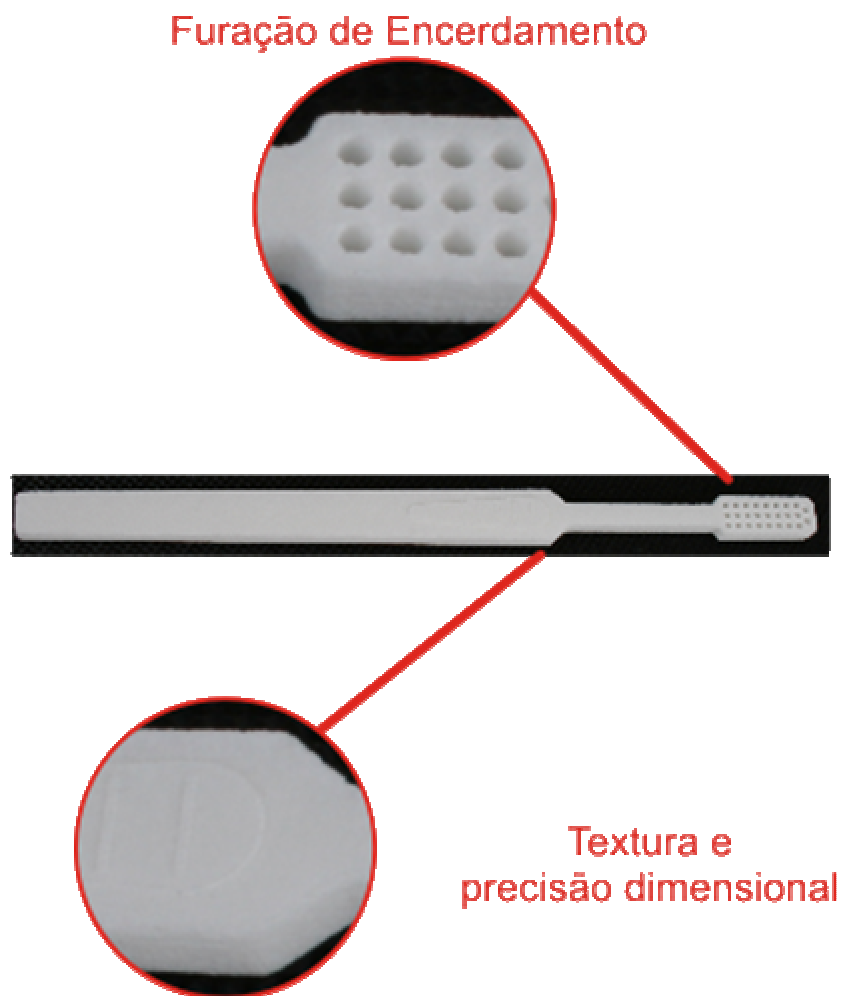


Figura 6.14. Protótipo em SLS da escova dental. Detalhes.

A figura 6.15, apresenta o protótipo protetor de cerdas construído em 3DPrint, processo de RP apresentado no capítulo 3, item 3.1.1.4 e na figura 6.16, pode-se ver o detalhamento do protótipo em 3DPrint.

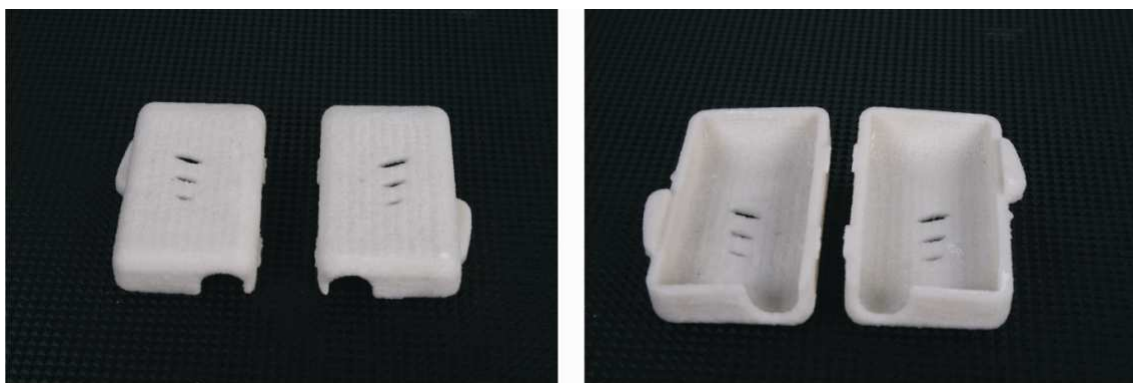


Figura 6.15. Protótipo em 3DPrint do protetor de cerdas. Imagem externa e interna.

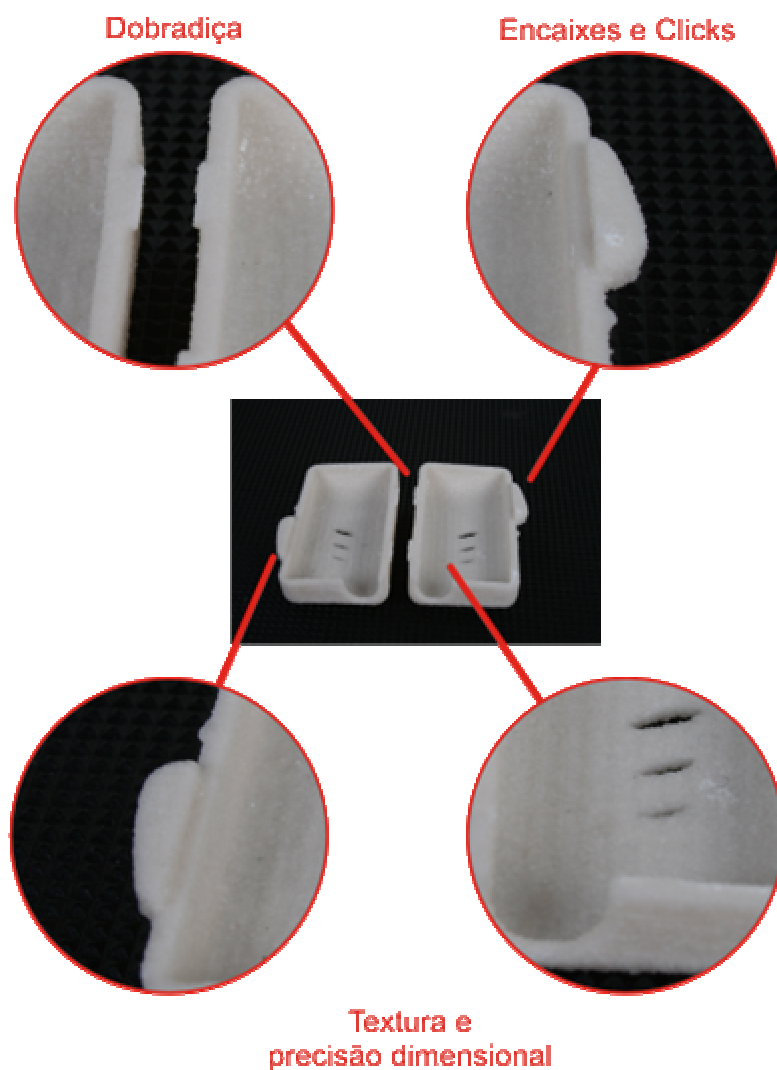


Figura 6.16. Protótipo em 3DPrint do protetor de cerdas. Detalhes.

Na figura 6.17, tem-se a imagem do protótipo da escova dental construído em 3DPrint, processo de RP apresentado no capítulo 3, item 3.1.1.4 e na figura 6.18 apresenta-se os detalhes do protótipo construído em 3DPrint.



Figura 6.17. Protótipo em 3DPrint da escova dental.

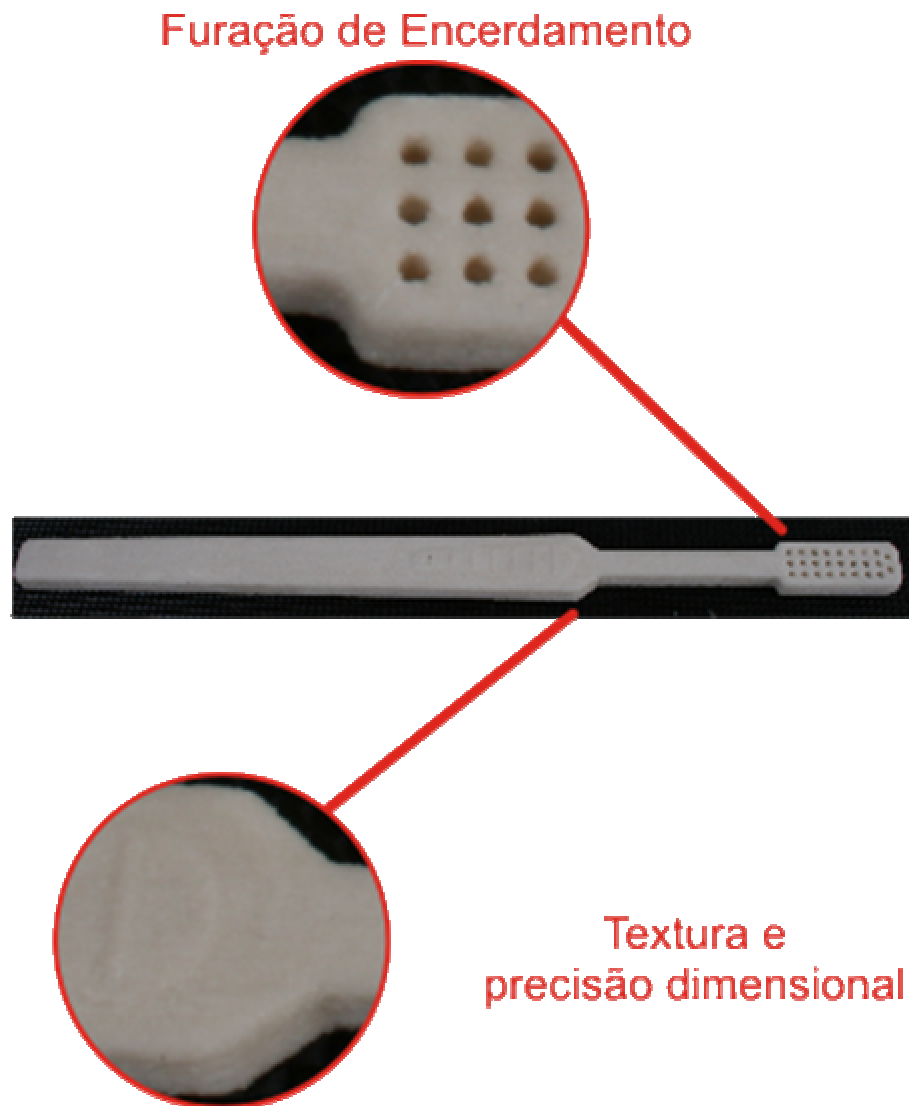


Figura 6.18. Protótipo em 3DPrint da escova dental. Detalhes.

6.4.2 – Protótipos Construídos em SRP - desbaste / remoção de Material

A construção dos protótipos em SRP foi feita a partir do equipamento MDX-500 de usinagem via comando numérico. Os protótipos foram feitos aproveitando aquilo que a tecnologia tem de mais importante, a usinagem no material mais próximo do produto a ser injetado em polímeros. Os protótipos da escova dental e do protetor de cerdas foram construídos em POM (poliacetal),

em função da proximidade de flexão e resistência com os materiais de injeção do produto final.

Seria possível a usinagem nos materiais finais dos produtos finais, PP para o protetor de cerdas e PET, PP *Random* ou ainda PEAD para a escova dental. Entretanto, no caso do PP *Random* (polipropileno *random*) não há disponibilidade no mercado de placas para usinagem na espessura necessária de 40 mm. No caso da escova dental, como são três materiais possíveis de injeção, o PET (politereftalato de etila), o PP *Random* (polipropileno *random*) e o PEAD (polietileno de alta densidade) optou-se pela prototipagem em POM pela disponibilidade do material a fim de se ter um protótipo de testes universal para esses três materiais possíveis de injeção.

Na Figura 6.19, tem-se o protetor de cerdas construído em POM (Poliacetel), por meio de SRP. E na figura 6.20, tem-se o detalhamento deste protótipo. A tecnologia SRP, foi apresentada no capítulo 3 item 3.1.2.

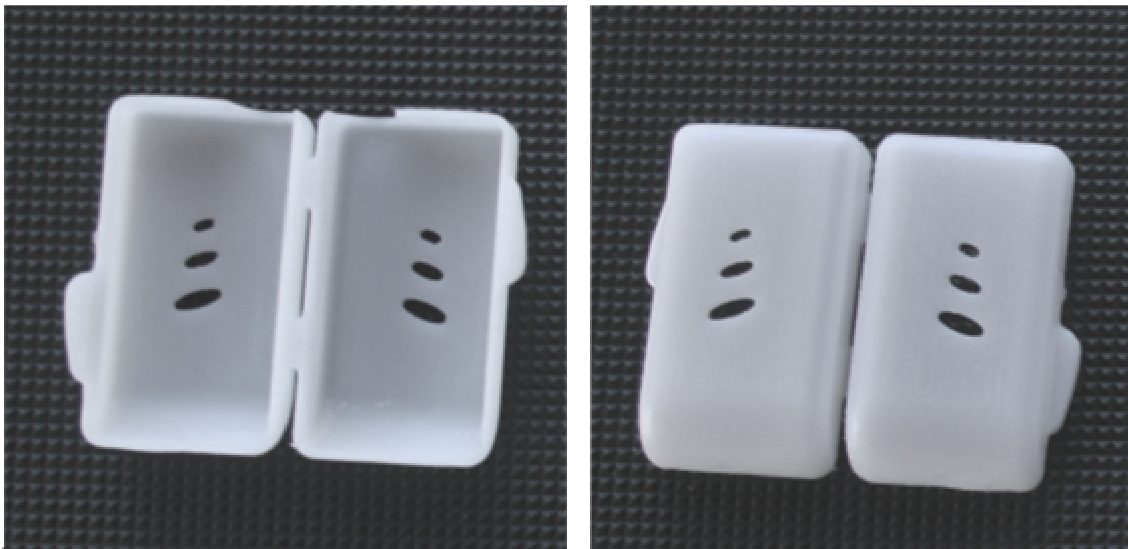


Figura 6.19. Protótipo em SRP do protetor de cerdas. Imagem externa e interna.

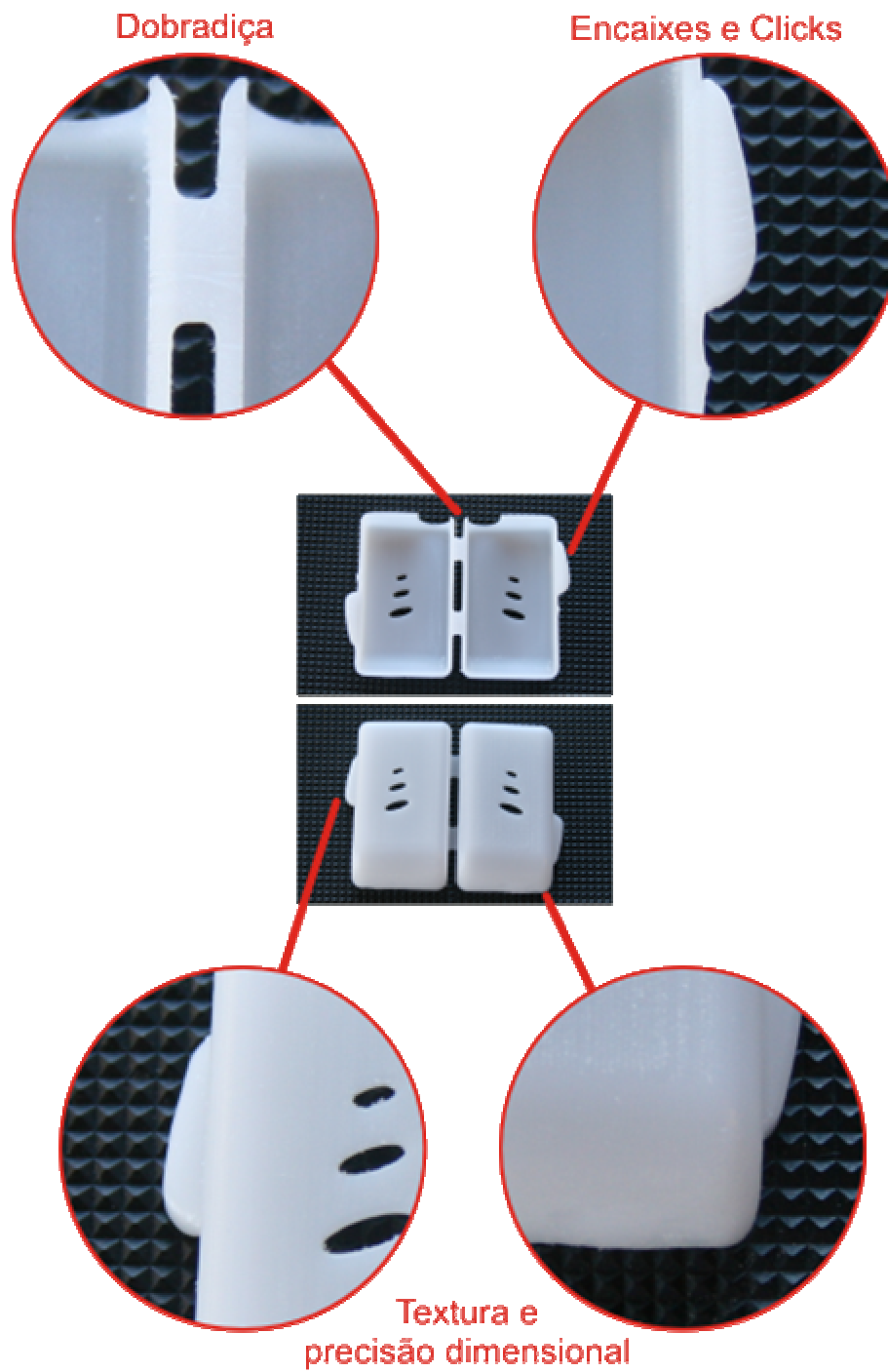


Figura 6.20. Protótipo em SRP do protetor de cerdas. Detalhes.

Na Figura 6.21, tem-se o protótipo da escova dental construído em POM (Poliacetato), por meio de SRP, tecnologia apresentada no capítulo 3 item 3.1.2. E na figura 6.22, tem-se os detalhes do protótipo.



Figura 6.21. Protótipo em SRP da escova dental.

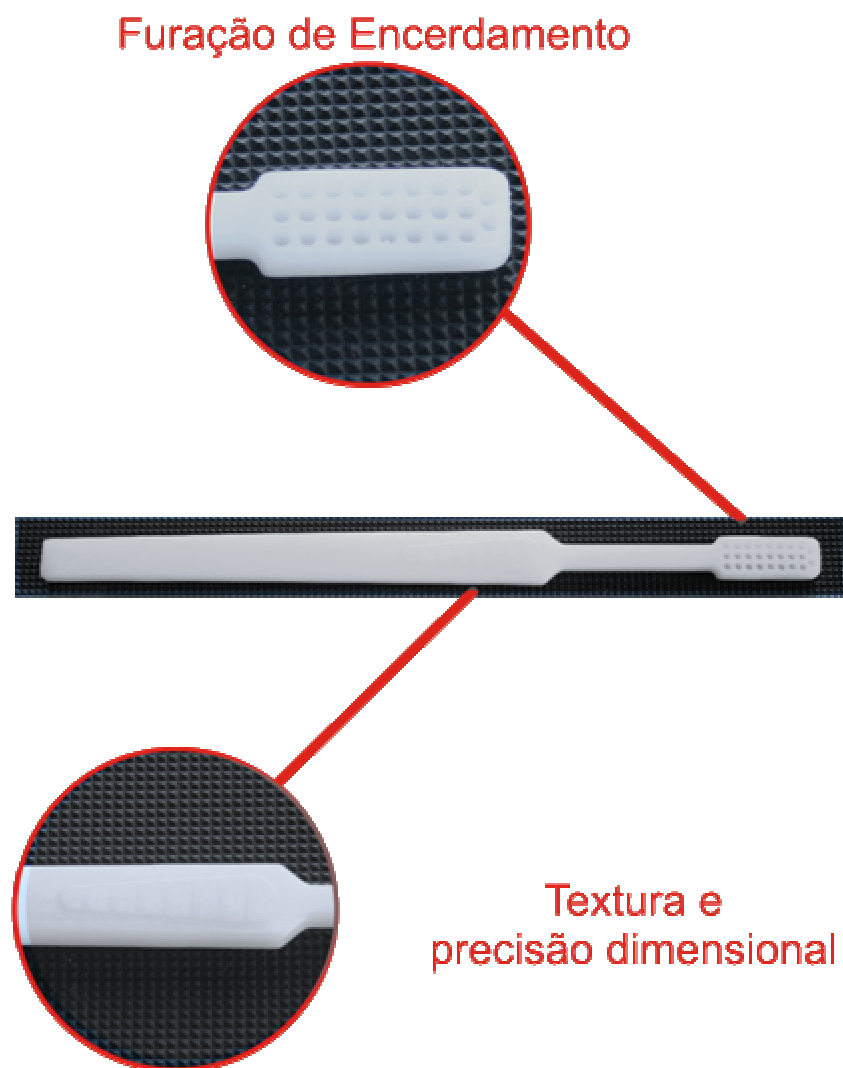


Figura 6.22. Protótipo em SRP da escova dental. Detalhes.

6.4.3 – Produtos Injetados

As imagens da figura 6.23 são referentes ao protetor de cerdas injetado em PP Random, apresenta-se aqui o produto final, o qual os protótipos devem simular.



Figura 6.23. Produto Injetado em Polipropileno (PP *Random*).

As imagens da figura 6.24 representam a escova dental injetada em PET, como referência aos protótipos construídos.



Figura 6.24. Produto injetado em Politereftalato de Etila (PET).

6.5 – Análise Comparativa dos Protótipos dos Estudos de caso

Para uma análise eficiente dos protótipos executados, fez-se necessário a comparação em separado das tecnologias de RP, a fim de obter os melhores resultados nesta tecnologia, para então comparar tais resultados com a tecnologia SRP e os produtos injetados.

6.5.1 – Comparação entre os protótipos construídos em RP

A simples comparação das imagens dos protótipos construídos nos três processos da tecnologia de RP de deposição ou adição de material, SLS, FDM e 3DPrint, já se pode notar grandes diferenças entre eles. As comparações atentas aos detalhes das imagens notam-se as diferentes texturas formadas e os diferentes níveis de detalhamento das peças, tanto o dimensional quanto a estrutura das peças apresentam diferenças entre si. E quanto aos aspectos funcionais os protótipos também apresentam diferentes graus de satisfação, usando-se a geometria tridimensional gerada por CAD (modelo 3D).

Protetor de Cerdas



Figura 6.25. Protótipos executados em RP do protetor de cerdas.

Tabela 6.3. Comparação entre os protótipos do protetor de cerdas construídos em RP:

<i>Processo de RP</i>	<i>SLS</i>	<i>FDM</i>	<i>3DPrint</i>
Equipamento Marca / Modelo	3DSystem / SinterStation 2000	Stratasys / Vantage i	ZCorp / ZPrint 310
Material de Construção	PA	ABS	Gesso / aglutinante / Cianoacrilato
Tempo de Execução Com pós- processamento	7 horas	7 horas e 29 minutos	3 horas
Custo Total	R\$ 60,00	R\$ 90,00	R\$ 50,00
Dimensões 47,70 x 37,50 x 8,90 mm referência modelo 3D	47,70 x 37,50 x 8,70mm	47,70 x 37,50 x 8,70mm	48,75 x 38,20 x 8,25mm
Espessura de parede 1,10 mm referência modelo 3D	1,10mm	1,10mm	1,65mm
Funcionamento da Dobradiça	Ainda funcionam após 150 aberturas	Quebraram no primeiro acionamento	Não funcionam – não foram formadas
Funcionamento do Click	Ainda funcionam após 150 encaixes	Não Funcionam – Os clicks se quebraram no primeiro encaixe	Não funcionam – não foram formados
Acabamento Superficial Escala de 1 a 6	3	4	1

O Custo Total representa o valor da hora dos equipamentos e do pós-processamento de cada protótipo.

Os itens da tabela 6.3 que contemplam as dimensões e espessura de parede refletem a acuidade do protótipo em relação ao projeto CAD da geometria do protetor de cerdas.

Os itens da tabela 6.3 que tratam do funcionamento da dobradiça, funcionamento do *click* e acabamento superficial, são avaliações empíricas, ou seja, de testes práticos e avaliação subjetiva que levam em consideração os pré-requisitos do projeto do protetor de cerdas.

Escova Dental



Figura 6.26 . Protótipos executados em RP da escova dental.



Figura 6.27. Protótipos executados em RP da escova dental. Detalhes da pega.

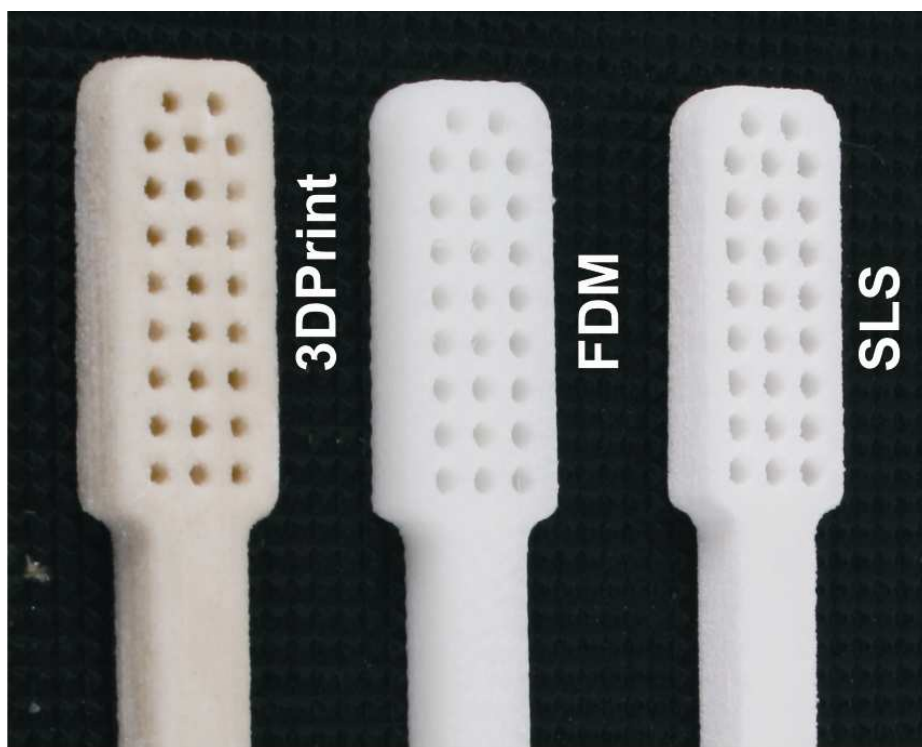


Figura 6.28. Protótipos executados em RP da escova dental. Detalhes dos furos de encerdamento.

Tabela 6.4. Comparação entre os protótipos da Escova Dental construídos em RP:

<i>Processo de RP</i>	<i>SLS</i>	<i>FDM</i>	<i>3DPrint</i>
Equipamento Marca / Modelo	3DSystem / SinterStation 2000	Stratasys / Vantage i	ZCorp / ZPrint 310
Material de Construção	PA	ABS	Gesso / aglutinante / Cianoacrilato
Tempo de Execução Com pós- processamento	7 horas	7 horas e 29 minutos	3 horas
Custo Total	R\$ 100,00	R\$ 150,00	R\$ 170,00
Dimensões 180 x 12,50 x 5,50mm Referência modelo 3D	180 x 12,40 x 5,40mm	180 x 12,40 x 5,40mm	181 x 13,20 x 6,10mm
Furos de Encerdamento 1,80mm de diâmetro 2,50mm de profundidade Referência modelo 3D	1,90mm de diâmetro 2,50mm de profundidade	1,60mm de diâmetro 2,50mm de profundidade	1,10mm de diâmetro 2,80mm de profundidade
Detalhamento da Pega	Bem detalhado	Bem detalhado	Detalhado
Acabamento Superficial Escala de 1 a 6	3	4	1

O Custo Total representa o valor da hora dos equipamentos e do pós-processamento de cada protótipo.

Os itens da tabela 6.4 que contemplam as dimensões e furos de encerdamento refletem a acuidade do protótipo em relação ao projeto CAD da geometria da escova dental.

Os itens da tabela 6.4 que tratam do funcionamento do detalhamento da pega e acabamento superficial são avaliações subjetivas que levam em consideração os pré-requisitos do projeto da escova dental.

6.5.2 – Comparação entre os protótipos construídos em SRP x RP x Produtos Injetados

Tendo em vista o baixo desempenho do processo 3DPrint na comparação entre os processos de RP, esse processo de RP foi retirado da comparação com a tecnologia de SRP.

Portanto, a comparação entre as tecnologias de SRP e RP foi feita entre: a tecnologia de SRP e os processos de SLS e FDM de tecnologia de RP, bem como o produto injetado final, usando-se a geometria gerada por CAD (modelo 3D) como referência.

Protetor de Cerdas

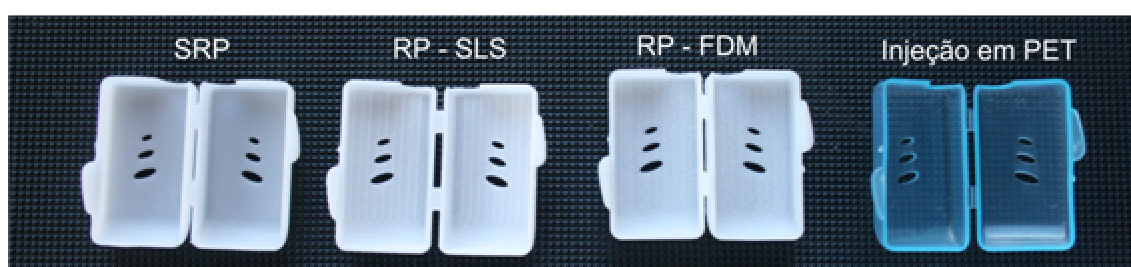


Figura 6.29. Protótipos e Produto construídos para comparação do protetor de cerdas. Imagens internas.

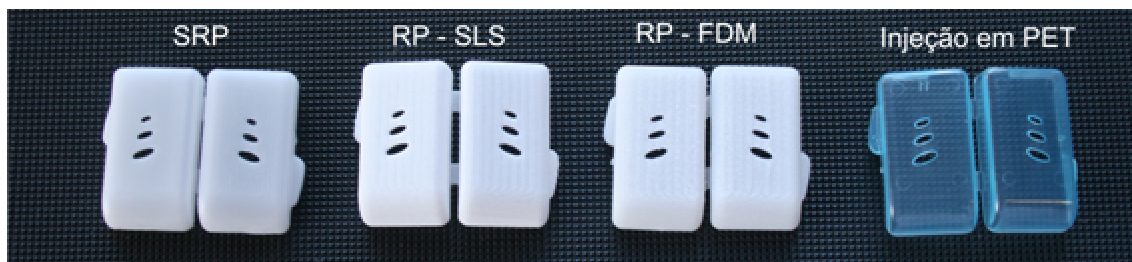


Figura 6.30. Protótipos e Produto construídos para comparação do protetor de cerdas. Imagens externas.

Tabela 6.5. Comparação entre os protótipos do protetor de cerdas construídos em SRP, RP (SLS / FDM) e Produto final injetado:

Tecnologia e Processo	SRP	RP SLS	RP FDM	Produto Final
Equipamento Marca / Modelo	Rolland DG / MDX-500	3DSystem / SinterStation 2000	Stratasys / Vantage i	Injetora de Polímeros
Material de Construção	POM	PA	ABS	PP Random
Tempo de Execução Com pós-processamento	3 horas e 21 minutos	7 horas	7 horas e 29 minutos	Ciclo de injeção: 20 segundos
Custo Total	R\$ 100,00	R\$ 60,00	R\$ 90,00	R\$ 0,06
Dimensões 47,70 x 37,50 x 8,90 mm ref.modelo 3D	47,70 x 37,50 x 8,50mm	47,70 x 37,50 x 8,70mm	47,70 x 37,50 x 8,70mm	47,70 x 37,50 x 8,90mm

Espessura de parede 1,10 mm Ref. modelo 3D	1,10mm	1,10mm	1,10mm	1,10mm
Funcionamento da Dobradiça	Quebraram no primeiro acionamento	Ainda funcionam após 150 aberturas	Quebraram no primeiro acionamento	Funcionam por mais de 1.000 vezes
Funcionamento do Click	Não foram formadas as cavidades de encaixe	Ainda funcionam após 150 encaixes	Não Funcionam – Os clicks se quebraram no primeiro encaixe	Funcionam por mais de 1.000 vezes
Acabamento Superficial Escala de 1 a 6	5	3	4	6

O Custo Total representa o valor da hora dos equipamentos e do pós-processamento de cada protótipo.

Os itens da tabela 6.5 que contemplam as dimensões e espessura de parede refletem a acuidade do protótipo em relação ao projeto CAD da geometria do protetor de cerdas.

Os itens da tabela 6.5 que tratam do funcionamento da dobradiça, funcionamento do *click* e acabamento superficial, são avaliações empíricas, ou seja, de testes práticos e avaliação subjetiva que levam em consideração os pré-requisitos do projeto do protetor de cerdas.

Escova Dental

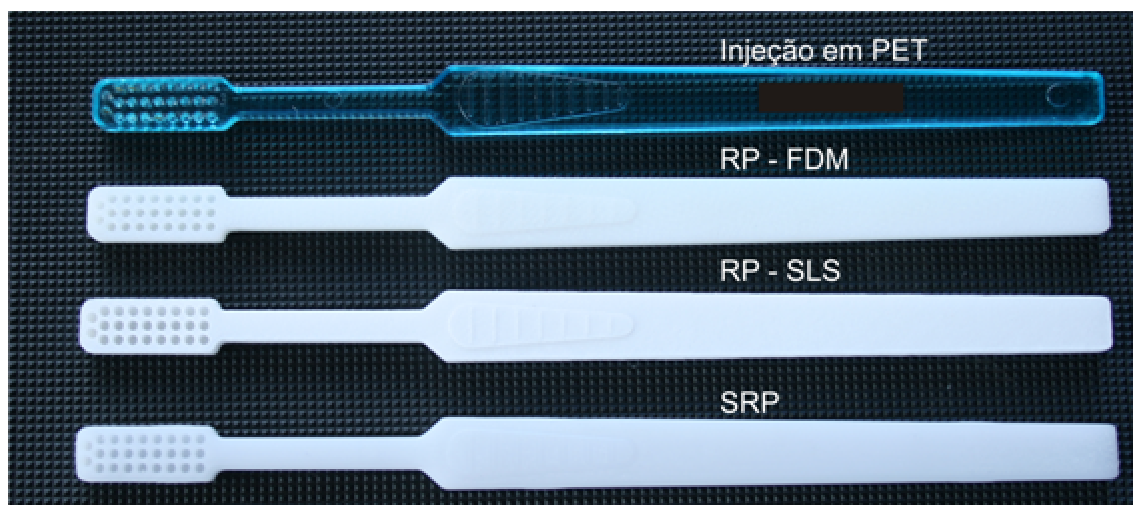


Figura 6.31. Protótipos e Produto construídos para comparação da escova dental.



Figura 6.32. Detalhes dos furos de encerdamento.



Figura 6.33. Detalhes da pega.

Tabela 6.6. Comparação entre os protótipos da escova dental construídos em SRP, RP (SLS / FDM) e Produto final injetado:

Tecnologia e Processo	SRP	RP SLS	RP FDM	Produto Final
Equipamento Marca / Modelo	Rolland DG MDX-500	3DSystem / SinterStation 2000	Stratasys / Vantage i	Injetora de Polímeros
Material de Construção	POM	PA	ABS	PET
Tempo de Execução Com pós-processamento	2 horas e 27 minutos	7 horas	7 horas e 29 minutos	Ciclo de injeção e cura: 1 minuto
Custo Total	R\$ 75,00	R\$ 100,00	R\$ 150,00	R\$ 0,08
Dimensões 180 x 12,50 x 5,50mm Ref. modelo 3D	180 x 12,40 x 5,40mm	180 x 12,40 x 5,40mm	180 x 12,40 x 5,40mm	180 x 12,60 x 5,80mm
Furos de Encerdamento 1,80mm de diâmetro 2,50mm de profundidade Ref. modelo 3D	1,75mm de diâmetro 2,50mm de profundidade	1,90mm de diâmetro 2,50mm de profundidade	1,60mm de diâmetro 2,50mm de profundidade	1,80mm de diâmetro 2,50mm de profundidade

Detalhamento da Pega	Bem detalhado	Bem detalhado	Bem detalhado	Bem detalhado
Acabamento Superficial Escala de 1 a 6	5	3	4	6

O Custo Total representa o valor da hora dos equipamentos e do pós-processamento de cada protótipo.

Os itens da tabela 6.6 que contemplam as dimensões e furos de encerdamento refletem a acuidade do protótipo em relação ao projeto CAD da geometria da escova dental.

Os itens da tabela 6.6 que tratam do funcionamento do detalhamento da pega e acabamento superficial são avaliações subjetivas que levam em consideração os pré-requisitos do projeto da escova dental.

6.6 – Avaliação dos resultados

No estudo de caso da aplicação do *chek-list* desenvolvido, foram construídos os protótipos em tecnologia RP que por sua vez foram comparados entre si e selecionados para uma comparação entre a tecnologia SRP, os protótipos selecionados da tecnologia RP e os produto finais.

Essa comparação ocorreu tanto para o protetor de cerdas quanto para a escova dental. Por isso as considerações desta avaliação estão separadas em itens que contemplem essa divisão do estudo.

6.6.1 – Considerações sobre a comparação dos protótipos construídos em RP

A construção e comparação entre os protótipos do protetor de cerdas construídos em tecnologia RP nos processos de SLS, FDM e 3DPrint, ocorreu de forma isenta seguindo o *check-list* utilizado na Megabox Design e Soluções.

O resultado é contundente quanto às diferenças entre os processos da tecnologia RP. Ao analisar os protótipos e a tabela 6.3 de comparação entre os

protótipos do protetor de cerdas construídos em RP, pode-se notar que há certa semelhança entre os processos de SLS e FDM e uma grande diferença no que tange os elementos avaliados entre SLS e FDM e o processo 3DPrint.

No item tempo de execução o processo de 3DPrint é duas vezes mais rápido que os outros processos.

No item custo total, há a maior discrepância entre os processos de SLS e FDM, havendo uma proximidade entre o custo do processo SLS e o processo 3DPrint, sendo o processo de 3DPrint o processo de custo mais baixo.

No item dimensões, os processos de SLS e FDM são os que mais se aproximam das dimensões projetadas no modelo CAD 3D, havendo distorções significativas nas dimensões do protótipo construído em 3DPrint, apesar de todos os processos terem apresentado alguma distorção em décimos de milímetros em uma das dimensões ao menos.

No item espessura de parede, os processos SLS e FDM mantiveram a espessura do modelo CAD 3D e o processo 3DPrint apresentou espessura 50% maior daquela esperada na comparação.

Nos itens: funcionamento da dobradiça e *click* notam-se as maiores diferenças entre os processos de prototipagem por RP, enquanto o processo SLS foi capaz de detalhar a dobradiça e *click*, como se pode ver nas figuras 6.11 e 6.12, possibilitando seus testes práticos, o processo FDM foi capaz apenas de retratar os elementos, pois ao serem testados romperam-se no primeiro acionamento, como se pode ver nas figuras 6.7 e 6.8. Já o processo 3DPrint não foi capaz de retratar ao menos as dobradiças impossibilitando o teste de funcionamento, como pode ser visto nas figuras 6.15 e 6.16.

No item acabamento superficial os protótipos construídos em SLS (figuras 6.11 e 6.12) e FDM (figuras 6.7 e 6.8) tiveram avaliação mediana graças à característica mais marcante dos processos de tecnologia RP, pois ficaram extremamente marcadas as camadas de construção dos protótipos. O protótipo do processo 3DPrint (figura 6.15 e 6.16) foi o que teve a pior avaliação graças às marcas superficiais das camadas de construção e também graças à porosidade do material que foi utilizado.

Se forem colocados os dados levantados e cruzados os valores de análise estabelecidos no *check-list* do protetor de cerdas, nota-se que apenas o processo SLS cumpriria tais solicitações.

Ao se analisar os protótipos e a tabela 6.4 (comparação entre os protótipos da escova dental construídos em RP), notam-se os mesmos resultados encontrados na construção dos protótipos do protetor de cerdas, talvez estabelecendo os limites dos processos da tecnologia RP para quase todos os protótipos construídos nesta tecnologia.

No item tempo de execução o processo de 3DPrint é duas vezes mais rápido que os outros processos. Tal como na construção do protetor de cerdas. Isso se dá em função dos protótipos da escova dental e do protetor de cerdas terem sido construídos em paralelo e ao mesmo tempo nos equipamentos de cada processo. Pois como a construção pode ser feita dentro de uma área onde cabiam os dois modelos ao mesmo tempo, assim foi feito.

No item custo total, houve uma diferença na comparação entre os protótipos do protetor de cerdas e na comparação entre os protótipos da escova dental. O protótipo do processo SLS tem custo 50% menor que o do processo de FDM e 70% menor que o do processo 3Dprint, sendo este o mais oneroso dos processos. Isso se dá em função do volume ocupado dentro dos equipamentos item determinante na composição dos custos da tecnologia RP.

No item dimensões, os processo de SLS e FDM são os que mais se aproximam das dimensões projetadas no modelo CAD 3D, onde houveram diferenças decimais de milímetro menor que 1% de variação para menos em relação ao modelo CAD 3D, havendo ainda, as mesma distorções significativas nas dimensões do protótipo construído em 3DPrint assim como as distorções encontradas no protetor de cerdas, as distorções no processo 3DPrint forma encontradas em todas as dimensões em variações para mais que as do modelo CAD 3D e essas variações não foram constantes representando 1% maior no comprimento, 6% maior na largura e 13% maior na altura.

No item furos de encerdamento, os processos SLS e FDM mantiveram a profundidade do furo do modelo CAD 3D, mas apresentaram variações no diâmetro do furo, já que o modelo CAD 3D tem diâmetro igual a 1,80mm e os processos SLS e FDM apresentaram 1,90mm e 1,60mm respectivamente. Quanto ao processo 3DPrint, a profundidade do furo foi de 2,80mm e o diâmetro de 1,10mm. A diferença entre os diâmetros de furação é explícita na figura 6.28.

No item detalhamento da pega, pode-se avaliar que todos os três processos foram capazes de detalhar a geometria, apesar de que o detalhamento do processo 3DPrint tenha ficado um pouco aquém do desejável. Como se pode ver na figura 6.27, as pegas foram detalhadas, mas a sensação tátil, elemento importante na avaliação dos protótipos, é melhor nos processos SLS e FDM do que no processo 3DPrint.

No item acabamento superficial os protótipos construídos em SLS e FDM tiveram avaliação media da mesma forma e razões encontradas no protetor de cerdas, ficando os protótipos marcados com as camadas de construção, como pode ser visto na figura 6.26.

Da mesma forma que ocorreu com o protetor de cerdas, no caso da escova dental, os dados levantados e cruzados com os valores de análise estabelecidos no *check-list*, nota-se que apenas o processo SLS cumpriria tais solicitações, mesmo que com o detalhamento de contorno do protótipo um pouco marcado pelas camadas de construção, como se pode notar na Figura 6.27 e 6.28.

6.6.2 – Considerações sobre a Comparação entre os protótipos construídos em SRP x RP x Produtos Injetados

A construção e comparação entre os protótipos construídos em tecnologia SRP utilizando o equipamento MDX-500 da empresa Rolland e tecnologia RP (processos SLS e FDM) e também o protetor de cerdas produzido por meio de injeção de polipropileno ocorreu de forma isenta seguindo o *check-list* utilizado pela Megabox Design e Soluções, tanto é que ao preparar-se essa comparação levaram-se em consideração as discrepâncias entre os processos SLS e FDM com o processo 3DPrint, que não apresentou condições satisfatórias para tal comparação e apesar do processo FDM não ter cumprido todas as exigências do protótipo, foi colocado em comparação em função de que em alguns itens avaliados apresentou bons resultados.

As diferenças foram notórias entre as tecnologias e as diferenças já analisadas entre os processos de RP serviram de balizamento entre esta comparação, bem como o protetor de cerdas injetado em PP.

Ao se analisar os protótipos e a tabela 6.5 de comparação entre os protótipos do protetor de cerdas construídos em SRP e RP e produto injetado, pode-se notar que há as semelhanças entre os processos de SLS e FDM tornam-se diferenças com a tecnologia SRP.

No item tempo de execução a tecnologia SRP apresentou uma redução de 50 % aproximadamente do tempo necessário da construção dos processos SLS e FDM da tecnologia RP.

No item custo total, a tecnologia SRP apresentou-se como alternativa mais onerosa ao protótipo, apesar de ter custo 10% maior que o processo mais caro da tecnologia RP (FDM).

No item dimensões, todos os protótipos apresentaram alguma distorção em décimos de milímetros em uma das dimensões ao menos. A tecnologia SRP teve variação para menor apenas na altura, bem como no processo SLS e FDM, mas essa variação ainda é mais significativa que a variação dos processos de RP.

No item espessura de parede, todos os processos mantiveram a espessura de parede do modelo CAD 3D.

Nos itens funcionamento da dobradiça e *click*, Apenas o processo SLS da tecnologia RP manteve a dobradiça e *click* funcionando como o modelo CAD 3D, como pode-se ver nas Figuras 6.34 e 6.35 abaixo.



Figura 6.34. Protótipo em RP - SLS

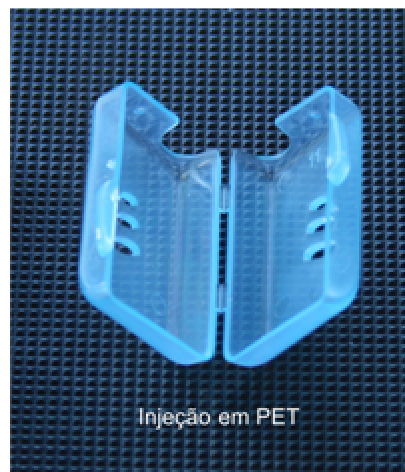


Figura 6.35. Produto injetado.

Os protótipos construídos em tecnologia SRP e tecnologia RP de processo FDM conseguiram formar os elementos que compunham a dobradiça,

entretanto, ao serem testadas quebraram-se no primeiro movimento. E ainda o protótipo da tecnologia SRP não foi capaz de formar a cavidade onde o *click* de encaixe se aloja em função do mesmo representar um ângulo negativo a usinagem por fresas. Como se pode ver nas figuras 6.36 e 6.37.



Figura 6.36. Protótipo em SRP

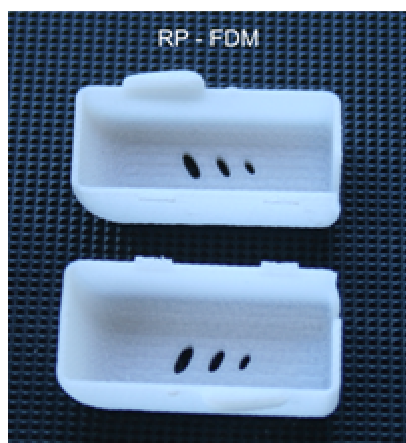


Figura 6.37. Protótipo em RP - FDM

O funcionamento dos elementos de dobradiça e *click* podem ser vistos de forma clara nas figuras 6.38 e 6.39.

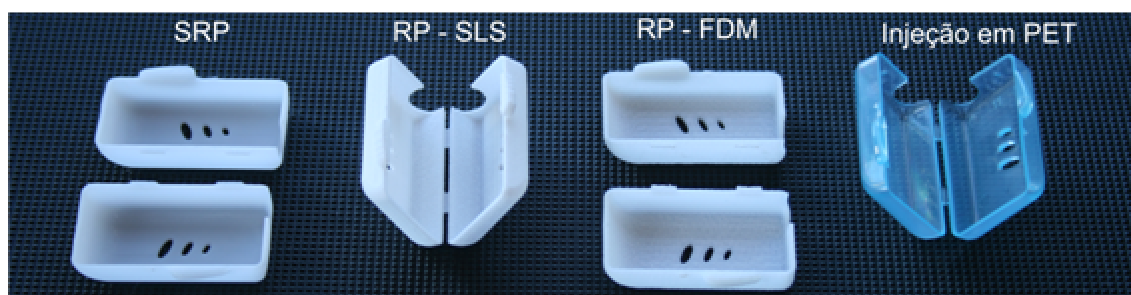


Figura 6.38. Funcionamento das dobradiças

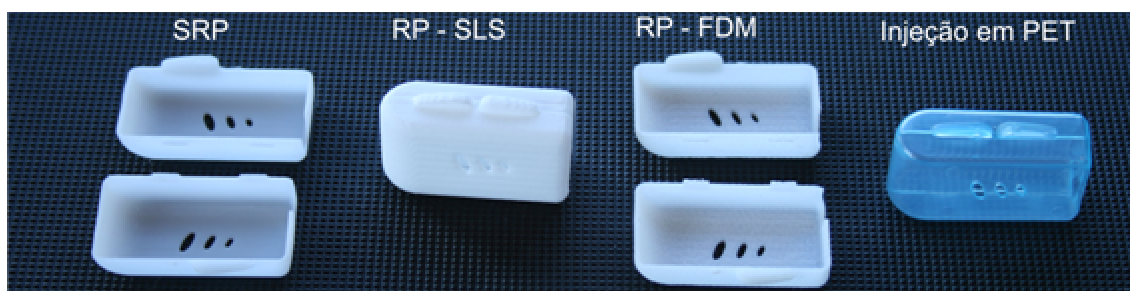


Figura 6.39. Funcionamento dos clicks

No item acabamento superficial os protótipos construídos em SLS (figuras 6.11 e 6.12) e FDM (figuras 6.7 e 6.8) tiveram avaliação mediana conforme já explicado anteriormente, em função de sua característica de construção de camadas, com é a tecnologia RP. O Protótipo construído em tecnologia SRP, teve desempenho ótimo neste item, (figuras 6.19 e 6.20), tendo vista que foram definidos parâmetros de desbaste que garantisse uma qualidade superior de usinagem.

Ao se colocar os dados levantados em cruzamento com os valores de análise estabelecidos no *check-list* do protetor de cerdas, nota-se que apenas o processo SLS cumpriria tais solicitações, mesma avaliação encontrada na comparação entre apenas os processos da tecnologia RP.

E ao se analisar os protótipos da escova dental e a tabela 6.6 de comparação entre os protótipos da escova dental construídos em SRP, RP (SLS / FDM) e Produto final injetado, notam-se resultados semelhantes aos encontrados na construção dos protótipos e comparação do protetor de cerdas. As diferenças foram claras entre as tecnologias e as diferenças já analisadas entre os processos de RP e serviram de balizamento entre esta comparação, bem como a escova dental injetada em PET. Ao se analisar os protótipos e a tabela 6.5 de comparação entre os protótipos do protetor de cerdas construídos em SRP e RP e produto injetado, nota-se que há as semelhanças entre os processos de SLS e FDM tornam-se diferenças com a tecnologia SRP.

No item tempo de execução, a tecnologia SRP apresentou uma redução ainda maior que aquela percebida no protetor de cerdas, foi percebida um redução de aproximadamente 70% do tempo de execução do protótipo em relação a tecnologia RP (SLS / FDM). Essa redução deu-se em função da característica da tecnologia de SRP, que precisa apenas atuar na área e

volume de interesse do protótipo, não havendo necessidade de utilizar todo o espaço reservado para construção de protótipo na mesa de usinagem.

No item custo total, a tecnologia SRP foi o processo de menor custo e esse resultado tem sua explicação no item anterior, ficando clara a importância do tempo e a maneira de utilização do espaço determinado para execução de protótipos nos equipamentos, na formação dos custos e preços dos protótipos.

No item dimensões, todos os protótipos apresentaram alguma distorção em décimos de milímetros em duas das dimensões, preservando-se apenas o comprimento do modelo CAD 3D, inclusive essa distorção também foi encontrada no produto final injetado em PET. Entretanto a diferença entre as dimensões entre os protótipos e o modelo CAD 3D e a diferença entre o produto injetado em PET e o modelo CAD 3D, foram em direções opostas, pois os protótipos tiveram uma redução de medidas em relação ao modelo CAD 3D e o produto final teve uma ampliação em relação ao modelo CAD 3D. Esse fato não ocorreu na comparação feita com o protetor de cerdas. Naquela comparação o produto injetado manteve as dimensões do modelo CAD 3D, nos levando a acreditar que a variação ocorrida entre o produto final na forma de escova dental sofreu alterações em função do material que foi utilizado na sua confecção, pois a variação ocorrida nos protótipos da escova dental seguiu o mesmo tipo de variação ocorrida no protetor de cerdas.

No item furos de encordamento, (figura 6.32) os processos SLS e FDM mantiveram a profundidade do furo do modelo CAD 3D, como já relatado na comparação entre os processos da tecnologia RP, apresentando variações no diâmetro do furo, onde o modelo CAD 3D tem diâmetro igual a 1,80mm e os processos SLS e FDM apresentaram 1,90mm e 1,60mm respectivamente. Quanto a tecnologia SRP, o diâmetro dos furos é de 1,75mm, mais próximo do modelo CAD 3D que os furos encontrados nos protótipos da tecnologia RP, mas ainda diferente do produto final na forma da escova dental que é exatamente aquele definido no projeto do modelo CAD 3D.

No item detalhamento da pega, se pode avaliar que todos os protótipos foram capazes de detalhar a geometria, assim como o produto final, apesar de no produto final existir uma diferença formal na pega, ou seja, não é o mesmo desenho definido no projeto do modelo CAD 3D como se pode notar na figura 6.33, mostrando que durante a execução do molde de injeção do produto

houve alguma alteração neste detalhe, tendo em vista que as informações digitais que geraram os protótipos e o produto final são as mesmas. Conforme relatado pelos projetistas da Megabox Design e Soluções, que cederam as informações para este estudo de caso.

No item acabamento superficial, os protótipos construídos em SLS e FDM tiveram avaliação média em função do processo de deposição de camadas encontrada na tecnologia RP e no que diz respeito ao protótipo da tecnologia SRP o acabamento é ótimo bem como sua sensação tátil, apesar de não ter sido aplicado nenhum pós-acabamento nas superfícies de toque. É perceptível essa qualidade superficial na figura 6.31.

Diferentemente do que ocorreu com o protetor de cerdas, no caso da escova dental, os dados levantados e cruzados com os valores de análise estabelecidos no *check-list*, o protótipo da tecnologia SRP foi o que melhor desempenhou as solicitações do *check list*. Sendo que o protótipo em SLS da tecnologia RP também é satisfatório, apesar de uma diferença maior no diâmetro dos furos de encordamento.

Capítulo 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 – Conclusão

O que este estudo buscou entender foi como os designers de produto podem definir qual a melhor tecnologia de prototipagem rápida e seus processos, na concepção dos produtos e no desenvolvimento de seus projetos, reduzindo com esta definição o tempo do ciclo de desenvolvimento e aumentando a qualidade de design e pré-produção de um produto.

Dentro dos conceitos de *Design for Manufacturing* (DFM) e *Rapid Product Development* (RPD), se faz necessário, para se ter protótipos eficientes para cada estágio dos projetos, fazer um *check-list* dos itens que envolvem o protótipo, para então se definir qual tecnologia de prototipagem rápida deve ser utilizada, SRP ou RP. Com esse *check-list*, com o conhecimento das tecnologias e com as informações obtidas na prática da prototipagem rápida é possível definir quais tecnologias e processos seriam ideais para execução de protótipos em diversas geometrias de produto. Ao se marcar as relevâncias dos itens, o usuário do *check-list*, deve ter conhecimentos das vantagens e desvantagens das tecnologias que se tem disponível para o protótipo.

Aplicado esse *check-list* nos dois produtos escolhidos para este estudo de caso, um protetor de cerdas para escova dental e uma escova dental, se pode constatar que o *check-list* é prático e eficiente mediante conhecimento prévio das tecnologias disponíveis para a prototipagem rápida, ao menos conhecimento de que se pode ter acesso a dois tipos de tecnologias de prototipagem rápida a SRP e a RP. E também é necessário saber ao menos algumas características de cada processo destas tecnologias disponíveis para uso. Ao se aplicar o *check-list* se definiu claramente para quais tecnologias e processos de prototipagem rápida os protótipos do protetor de cerdas e da escova dental deveriam ser direcionados.

O processo SLS da tecnologia de RP foi o mais bem sucedido no caso do protetor de cerdas, tendo em vista a necessidade de testes do produto em suas funções de dobradiças e clicks. Neste processo o protótipo respondeu

perfeitamente ao teste, e se compara-lo ao produto final injetado em polipropileno (PP *Random*) os dois apresentam a mesma funcionalidade. Ao se tentar executar estas funções nos outros processos da tecnologia RP, o FDM e o 3DPrint e na tecnologia SRP, os protótipos se romperam ou ainda não houve a formação de alguns detalhes de clicks e dobradiças.

No caso do processo FDM, houve a formação dos elementos de *clicks* e dobradiças, mas na primeira tentativa de teste o protótipo se rompeu exatamente na área de dobradiça, mostrando a incapacidade, ao menos no material e na estratégia de execução, de se ter um protótipo funcional neste produto.

No caso do processo 3DPrint, não houve a formação das dobradiças impossibilitando o teste de funcionamento, que consistia apenas no ato de fechar o dispositivo protetor de cerdas.

No caso da tecnologia de SRP, não houve a formação do encaixe do *click*, pois este estava geometricamente negativo ao ângulo de usinagem do equipamento. Mesmo que se usasse um equipamento com mais eixos de atuação, seria muito difícil de executar tal encaixe, tendo em vista seu tamanho diminuto e sua posição em relação a toda geometria da peça, pois o acesso ao encaixe pelas ferramentas de usinagem seria uma barreira na estratégia de execução, claro que esta impossibilidade aconteceria se mantida a geometria como foi concebida.

Portanto, ao se buscar teste de funcionalidade, onde dobradiças plásticas e *clicks* de fixação sejam elementos muito importantes, como no caso de produtos que serão injetados em materiais com propriedades de flexão, o processo de SLS da tecnologia de RP, mostrou-se, no estudo de caso, uma indicação melhor que os outros processos da tecnologia RP e também superior a tecnologia SRP, tendo em vista o tempo, o custo e a precisão do protótipo. Pois dos outros processos e da outra tecnologia poderem ser adaptados para atender tais exigências os custos, o tempo e a precisão ficariam comprometidos.

Entretanto, se objetivo é ter um protótipo não de funcionalidade, mas de precisão dimensional, e de análise geométrica, onde seriam estudados os aspectos de possibilidade de produção, o processo de FDM atenderia perfeitamente o *check-list*. Assim como, a tecnologia de SRP e o processo

3DPrint da tecnologia de RP atenderiam muito bem modelos volumétricos de estudo, com alguma desvantagem para o processo 3DPrint, em função de sua baixa precisão dimensional.

No caso do experimento com a escova dental, onde o produto injetado em PET necessitava ser testado por protótipos que mantivessem a precisão dimensional, tivessem uma boa simulação do material injetado e tivessem um acabamento superficial liso sem exigir grande complexidade geométrica, o melhor resultado alcançado foi pela tecnologia de SRP, pelo bom acabamento superficial, pela precisão dimensional e pela formação muito próxima do produto injetado nos furos de encerdamento.

O processo SLS da tecnologia RP, apesar de apresentar boa estabilidade dimensional e furos de encerdamento bem definidos e próximos das medidas exigidas, teve problemas na representação do perfil do protótipo e na aspereza de sua superfície. Porém, atenderia muito bem os principais requisitos do protótipo.

O processo FDM da tecnologia RP, teve boa precisão dimensional, mas nos furos de encerdamento teve uma variação considerável e neste caso da escova dental estaria desqualificado, pois a variação de 0,2 mm é significativa para o teste da escova no equipamento de encerdamento.

O processo 3DPrint, não cumpriu as exigências de precisão dimensional nem no corpo da escova dental e muito menos na precisão dos furos de encerdamento que apresentaram uma variação para menos no diâmetro do furo de 0,7mm.

Portanto, ao se buscar teste de funcionalidade, onde detalhes como furações, precisão dimensional, acabamento superficial e simulação de materiais sejam elementos muito importantes, a tecnologia de SRP, apresenta-se como uma boa opção e se sobrepõe aos processos da tecnologia RP. Mesmo que os protótipos fossem destinados para modelos de estudo volumétricos e não para testes funcionais a tecnologia de SRP, ainda assim seria uma ótima opção de execução, pois o tempo de execução poderia ser ainda menor, e por consequência seu custo, diminuindo-se o nível de acuidade de seu programa de usinagem por controle numérico. Porém, o processo SLS da tecnologia RP, apresentou-se como uma boa opção de custo, mesmo que

com o dobro de tempo de execução da tecnologia de SRP e do processo 3DPrint da tecnologia RP.

Desta forma, pode-se entender que as tecnologias e processos de prototipagem rápida, ainda que muito diferentes em seus materiais e meios de construção dos protótipos, podem executar facilmente e rapidamente a custos acessíveis, qualquer tipo de produto de pequeno porte, pois suas áreas de trabalho ainda são limitadas, que tenham sido projetados em software CAD.

O *check-list* atendeu o propósito deste experimento, apesar de ser simples, quanto às necessidades funcionais dos produtos. O *check-list* pode atender as necessidades de uma empresa no que diz respeito aos projetos que executa e pode ser decisivo na hora de se optar pelas tecnologias e processos de prototipagem rápida. Mesmo a empresa tendo um equipamento *in-house*, a execução de protótipos que seus projetos exigem, este deve optar pela utilização do *check-list* para definição de qual tecnologia e processo de prototipagem utilizar. Pois todas as tecnologias e processos podem ser utilizados em um momento ou outro do processo de desenvolvimento de produtos e que ao se escolher uma dessas formas de prototipagem rápida é necessário o conhecimento dos limites de cada tecnologia e processo, caso contrário, o projeto do produto seria comprometido em tempo e recursos.

Foram feitas comparações entre as tecnologias e processos de prototipagem rápida e foram estabelecidas algumas diretrizes para tomada de decisão de qual tecnologia utilizar. Mas nesta busca o que ficou evidente é o quanto é necessário o levantamento de informação e clareza no objetivo do protótipo. Não é possível estabelecer a melhor tecnologia, mas sim estabelecer que para se construir um protótipo eficiente é necessário saber o que se quer dele no desenvolvimento do produto que este protótipo representa. Cada produto passa pelo processo de desenvolvimento necessitando de protótipos ao longo deste ciclo, portanto para cada fase há uma tecnologia que pode ser utilizada e o quanto se pretende gastar, o tempo disponível para execução, a qualidade superficial, a resistência mecânica e precisão dimensional, em fim qual a aplicação do protótipo é o que irá definir qual a melhor tecnologia ou processo de prototipagem rápida se deve utilizar.

7.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Mediante os resultados analisados, algumas sugestões podem ser apresentadas para pesquisas futuras:

- Extrapolar a comparação entre os processos da tecnologia RP, contemplando outros processos não comparados nesta pesquisa;
- Pesquisar outros materiais e aplicações da tecnologia de SRP, permitindo uma compreensão melhor dos limites desta tecnologia;
- Novas revisões de literatura, pois novas tecnologias e processos estão surgindo a cada momento, tentando satisfazer a demanda de velocidade de desenvolvimento de produto;
- Um estudo sobre métodos de tomada de decisão;
- Elaboração de um *check-list* mais específico quanto à utilização dos protótipos no desenvolvimento do produto;
- Um estudo mais abrangente quanto ao tipo dos produtos a serem desenvolvidos, pois os produtos de injeção plástica representam uma parcela dos produtos, pesquisas em protótipos que contemplem produtos de outras formas de produção se fazem necessário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3D SYSTEM. **RP equipments**. Informação sobre equipamentos Disponível em
<<http://www.3dsystems.com>> (Acesso em: 10/03/2008);

ALONSO-RASGADO, T.; THOMPSON, G. **A rapid design process for Total Care Product creation**. Journal of Engineering Design, Vol 17 No. 6, 2006;

ASHLEY, Steven. **Rapid-response design**. Mechanical Engineering. 1997 Dec 1;119(12): 72-74. In: Academic Research Library. Available from:
<http://www.proquest.com>;

BAK, D. **Rapid prototyping or rapid production**. Assembly Automation; 2003; 23, 4; ABI/INFORM Global. pg. 340;

BAXTER, M. **Projeto de Produto**. Editora Edgard Blucher; São Paulo, 1998;

BERTO R. M. V. S.; NAKANO D. N. **Metodologia da Pesquisa e a Engenharia de Produção - Estratégia e Organizações**. ENEGEP. 1998;

BRYMAN, Alan. **Research methods and organization studies**. London: Unwin Hyman, London, 1989;

BIBB, R., TAHA, Z., BROWN, R., WRIGHT, D. **Development of a rapid prototyping design advice system**. Journal of Intelligent Manufacturing, 1999 10, 331 – 339. In: Academic Research Library. Available from:
<http://www.proquest.com>;

BUSATO F. ANDRÉ. **Parâmetro de moldagem por injeção de termoplásticos em moldes fabricado por estereolitografia com resina Somos 7110**. Universidade Federal de Santa Catarina, tese de mestrado, Florianópolis, 2004;

CAMPBELL, R.; DE BEER, D.; BARNARD, L.; BOOYSEN, G.; TRUSCOTT, M; CAIN, R.; BURTON, M.; GYI, D.; HAGUE, R. **Design evolution through customer interaction with functional prototypes.** Journal of Engineering Design. Vol 18 No. 6, 2007.

CANCIGLIERI, O. J., and Young, R. I. M., - **Information sharing in multiviewpoint injection moulding design and manufacturing.** International Journal of Production Research, vol 41, no. 7, 1565-1586. 2003;

CANCIGLIERI, O, IAROSINSKI, A., SELHORST, A., **Análise comparativa entre os processos de prototipagem por deposição ou remoção de material na concepção de novos produtos.** COBEF, 2007;

CHAU, C.K. e LEONG, K.F. **Rapid Prototyping: Principles & Application in Manufacturing**, John Wiley & Sons, Inc, 2003.

CHUANG, W. and GRADY, P., **Design Object Decomposition in a Product Development Chain**, Internet Lab Technical Report TR 2001-12, Department of Industrial Engineering, Seamans. Center, University of Iowa, Iowa City, Iowa 52242, USA. 2001.

CLAY, T.G., **Rapid Prototyping Accelerates the Design Process.** MACHINE DESIGN MARCH 9, 2000.

COSTA, S. E. G. **Definições Metodológicas e Métodos de Pesquisa.** PPGEPS/PUCPR.

CORNEY, J. **Really rapid prototyping.** Assembly Automation; 2003; 23, 4; ABI/INFORM Global. pg. 312.

CYBAMAN Tech. **Cybaman Replicator**. Informação sobre o equipamento.

Disponível em: <<http://www.cybamantech.co.uk>> (Acesso em 20/02/2008);

CURTIS, Will. **Rapid Prototyping – Trully Functional Prototype**. Time-

Compression Technologies. March/April, 2006. Disponível em:

<<http://www.timecompress.com>> (Acesso em: 01/02/2008);

DATAR, S. and JORDAN, C. **New Product Development Structures and Time-To-Market**. Management Science; Vol. 43, n. 4, April 2001;

DEAN, Al. **Cybaman Replicator, a good example of SRP**. Prototype

Magazine, Issue3, 2004;

DEMO, Pedro. **Pesquisa e construção de conhecimento**. Rio de Janeiro:

Tempo Brasileiro, 1996;

DEMO, Pedro. **Introdução à metodologia da ciência**. São Paulo: Atlas, 1987. 118 p;

DENFORD CNC. **Subtractive Rapid Prototyping**. Informação sobre

equipamentos. Disponível em: <[http:// www.denford.com](http://www.denford.com) > (Acesso em: 23/01/2008).

DIETER, G. E. **Engineering Design**, 1991 (McGraw-Hill).

DIETER R, ECK, O. and DALAKAKIS, S. **Knowledge-based support of rapid product development**. J. Eng. Design, Vol. 15, n. 4, August 2004, 367–388.

DUNLAP, Earl. **RP Tempering**. Disponível em: <<http://www.timecompress.com>> (Acesso em 23/11/2007);

DVORAK, P. **Model early, model often, and pass the prototype around**.

Machine Design 55, August - 19, 2004.

- DVORAK, P **Best practices for USING RAPID PROTOTYPES**. Machine Design. 2004 Aug 19;76(16): 55-58. In: ProQuest Science Journals Available from: <http://www.proquest.com>;
- ENVISIONTEC. **Materials**. Informação sobre materiais de RP. Disponível em: <<http://www.envisiontech.de>> (Acesso em 20/01/2008);
- EVANS, M. A., CAMPBELL, R. I., **A comparative evaluation of industrial design models produced using rapid prototyping**. Rapid Prototyping Journal; 2003; 9, 5; ABI/INFORM Global. pg. 344.
- FERREIRA, J. C., SANTOS, E., MADUREIRA, H., CASTRO, J.. **Integration of VP/RP/RT/RE/RM for rapid product and process development**, In: Rapid Prototyping Journal, Vol. 12 No. 1, pp. 18-25, 2006;
- FLETCHER. R., UPCRAFT, S. **The rapid prototyping technologies**. Assembly Automation; 2003.
- FLICK, Uwe; NETZ Sandra. **Uma introdução à pesquisa qualitativa**. 2.ed. – Porto Alegre: Bookman, 2004;
- FRIEDEL, R. and LIEDTKA, J. **Possibility thinking: lessons from breakthrough engineering**, Journal of Bussines Strategy, Vol 28 No. 4, pp 30-7, 2007;
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002;
- GAITHER, Norman, Greg Frazier - **Administração da produção e operações**. Thomson Learning, 2002;
- GORNI, A. A. **Introdução à prototipagem rápida e seus processos**, Plástico Industrial, 2003;

GRIMM, Todd. **User's Guide to Rapid Prototyping. 2004.** Disponível em:

<<http://www.tagrimm.com>> (Acesso em 01/03/2008);

GRIMM, Todd. **Choosing the Right RP System.** A study of seven RP systems, 2005;

HAGUE, R. J., CAMPBELL, I. and REEVES, P. **Integration of solid freeform fabrication in design.** In Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, August 2001 (University of Texas).

HAGUE, R. J., CAMPBELL, I. and REEVES, P. **Integration of solid freeform fabrication in design.** Time Compression Technology., August 2002, 10(4), 48±53.

HAGUE, R., MANSOUR, S., SALEH, N. **Design opportunities with rapid manufacturing.** Assembly Automation; 2003; 23, 4; ABI/INFORM Global pg. 346.

HUR, J., LEE, K., Zhu-hu, and KIM, J. **Hybrid rapid prototyping system using machining and deposition.** Computer-Aided Design., 2002, 34(10), 741–754.

LAN, H., DING, Y., HONG, J., HUANG, H. LU, B. **A web-based manufacturing service system for rapid product development.** Computers in Industry. 2004 May 1;54(1): 51-67. In: ProQuest Science Journals .Available from: <http://www.proquest.com>;

IIDA, I. **Ergonomia Projeto e Produção.** Blücher, São Paulo, 1990.

JACOB, G.K, KAI, C.C., MEI T. **Development of a new rapid prototyping Interface.** Computers in Industry 39_1999. 61–70.

JACOBS, P. F. **From stereolithography to LENS: a brief history of laser fabrication.** In International Conference on *Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing*, San Antonio, Texas, 8±10 April 2002.

JACOBS, P. F. **Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography.** SME,1992.

JONES,D. **The future and conclusion – Rapid Prototyping.** Department of Mechanical Engineering, University of Bath. Disponível em: <<http://www.bath.ac.uk/~en0dpj/The%20future.htm>> Acesso em (20/01/2008);

KIM, G. D., and OH, Y. T. **A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part B -- Engineering Manufacture 222, no. 2: 201-215. 2008;

KOCHAN, D., CHEE, C., ZHAOHUI, D., **Rapid prototyping issues in the 21st century.** Computers in Industry 39, 1999. 3–10.

LESPRIER, T., MOGNOL, P., FURET, B., HASCOET, J. Y. **A new method of prototypes and dies manufacturing.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Oct 2004; 218, B10; ProQuest Science Journals, pg. 1423.

LOUGHLIN, C., **Rapid prototyping - just starting, or nearing the end?** Assembly Automation; 2003; 23, 4; ABI/INFORM Global. pg. 310.

MALONE, B., LIPSON, H. **Fab@Home: the personal desktop fabricator kit.** In: Rapid Prototyping Journal. Vol 13 No. 4 – 245-255, 2007;

MINELLI AG CNC SYSTEM . **CNC Portalmaschinen**. Informação sobre o equipamento. Disponível em: <http://www.minelli-cnc.ch> (Acesso em 10/10/2007);

MINITECH MACHINERY CORPORATINO. **CNC Mini-Mill/3 PRO with 4th Axis Rotary Table**. Informação sobre o equipamento. Disponível em: <http://www.minitech.com> (Acesso em 10/10/2007);

NAKAGAWA, T. "**Advances in Prototype and Low Volume Sheet Forming and Tooling**." IN: JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY.1998, p. 244-250;

NAKANO, Davi Noboru; FLEURY, Afonso C.C. **Métodos de pesquisa na engenharia de produção**. In: XVI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. **Anais...** Piracicaba, 1996. UNIMEP/ABEPRO;

NETTO, A.C., KAMINSKI, P.C. **The Concept of Product Design**. Vol.2 nº 2 March 2004 Product: Management & Development.

NEWCOMER, J. L., HOEKSTRA, N. L., KITTO, K. L., MCKELL, E. K. **Using Rapid Prototyping to Enhance Manufacturing and Plastics Engineering Technology**. Journal of Engineering Technology; Spring 2004; 21, 1; ProQuest Science Journals pg. 10.

MELLO, C.H.P., SILVA, C.E.S., COSTA, S.C., **Comparação de três diferentes tecnologias de prototipagem rápida em relação a critérios de custo e tempo**. XXVI ENEGEP, 2006, ABEPRO 1.

OLIVEIRA, Silvio Luiz. **Tratado de metodologia científica**. São Paulo: Pioneira, 1999. 320p;

ONUH, S. O. and YUSUF Y. Y. **Rapid Prototyping Technology: Applications and benefits for rapid products development**, Journal of Intelligent Manufacturing, 1999;

PALM, W. **Rapid Prototyping Primer** (May 1998), revised 30 July 2002, Penn State [Learning Factory](#)., 2002.

PHAM, D. T. and GAULT R. S. **A review of rapid prototyping technologies and systems**. Machine and Manufacturing, 1996;

PHAM, D. T. and GAULT R. S. **A comparasion of rapid prototyping technologies**, Machine and Manufacturing, 1997;

PHAM, D.T. and GAULT, R.S. **A Comparison of Rapid Prototyping Technologies**. Int Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol 38 No 10-11 (1998), pp 1257-1287.

PUGH S., **Total Design**, Addison Wesley, 1990.

QU, X., STUCKER, B. **A 3D surface offset method for STL-format models**. Rapid Prototyping Journal; 2003; 9, 3; ABI/INFORM Global. pg. 133.

REDE NACIONAL DE PROTIPAGEM RÁPIDA DE PORTUGAL. **Comparação de Sistemas e Processos de RP e SRP**. Projeto de Implantação da Rede, 2002;

RIGELSFORD, J. **Rapid Prototyping, Tooling and Manufacturing**. Assembly Automation; 2003; 23, 4; ABI/INFORM Global. pg. 404.

RIVETTE, M., HACOET, Y. and MONGOL, P.. **A graph-based methodology for hybrid rapid design**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part B -- Engineering Manufacture 221, no. 4: 685-697, 2007;

ROLAND DG Corporation. **Design Industry and Prototyping Segment**. 2002;

ROLAND DG Corporation. **MDX-540**. Informação sobre o equipamento. Disponível em: <<http://www.rolandg.com>> (Acesso em 10/10/2007);

ROSOCHOWSKI, A. MATUSZAK, A. **"Rapid Tooling: The State of the Art"**
IN: JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY 106, 2000,
p. 191-198;

SANTLER G, KARCHER H, KERN R. **Stereolithography versus milled three-dimensional models: comparison of production method, indication, and accuracy.** Computer Aided 1998; 3(5): 248-56;

SANTLER G, KARCHER H, KERN R. **Stereolithography models vs. milled 3d models. Production, indications, accuracy.** Mund Kiefer
Gesichtschir 1998 Mar; 2(2): 91-5;

SAURA, C.E. et al., **Rapid Prototyping: Concepts, Applications, and Potential Utilization in Brazil** - 15th International Conference in
CAD/CAM, Robotics & Factories of the Future (CARS&FOF'99). 1999.

SAURA, C. E. **Aplicação da prototipagem rápida na melhoria do processo de desenvolvimento de produtos em pequenas e médias empresas.**Campinas, SP, 2003.

SILVA, Edna Lúcia – **“Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação”** - Edna Lúcia da Silva, Estera Muszkat Menezes. – 3. ed. rev. atual. – Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001;

STRATASYS, **FDM ACCURATE, RAPID MANUFACTURING AND PROTOTYPING SYSTEMS.** Informação sobre equipamentos. Disponível em: <[http://www. Stratasys.com](http://www.Stratasys.com)> (Acesso em 07/06/2007);

STROUD, I., XIROUCHAKIS, P.C., **STL and extensions.** Advances in
Engineering Software 31 (2000) 83–95.

THOMPSON, H.A., RAMOS-HERNANDEZ, D.N., FU, J., JIANG L., CHOI, I.,

CARTLEDGE, K., FORTUNE, J. and BROWN, A. **A flexible environment for rapid prototyping and analysis of distributed real-time safety-critical systems.** Control Engineering Practice, Volume 15, Issue 1, January 2007, Pages 77-94.

TOULMIN, S.: **The Hidden Agenda of Modernity.** Cosmópolis New York: The Free Press. 1990;

WU, T. and CHEUNG, E. **Enhanced STL.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology 29, no. 11/12: 1143-1150. 2006;

ULRICH, K.T. e EPPINGER, S.D. **Product Design and Development.** McGraw-Hill, Inc. 1995.

VOLPATO, Néri; **Prototipagem rápida/ferramental rápido no processo de desenvolvimento do produto.** Máquinas e Metais, p. 86-89, junho de 1999;

VOLPATO, Néri; **Prototipagem Rápida.** Ed. Blutcher. 2007;

WOHLERS, Terry, GRIMM, Todd. **Is CNC Machining Really Better Than RP?** Perspective, 2003.

WOHLERS, Terry. **Rapid Prototyping.** Foundry Management & Technology p. 81, 2003 EBSCO Publishing;

WOHLERS, Terry. **Wohlers Report.** 2006.

WOHLERS, Terry. **Wohlers Report.** 2007.

WRIGHT, Paul K. **Rapid prototyping in consumer product design.** Association for Computing Machinery. Communications of the ACM. 2005 Jun 1;48(6): 36-41. In: ProQuest Science Journals. Available from: <http://www.proquest.com/>;

YAN, X. and GUP, A **review of rapid prototyping technologies and systems.**
Machine and Manufacturing, 1996;

Ye X., Liu H., Chen L., Chen Z., Pan X., Zhang S. **Reverse innovative design
- an integrated product design methodology** .*CAD Computer Aided
Design*, 40 (7), pp. 812-827. 2008;

YIN, Robert K. **Planejamento e métodos.** Porto Alegre: Bookman, 2001;

Z Corporation. **Industry Case Study, Medical Modeling Corporation.**
Disponível em: <<http://www.zcorp.com>> (Acesso em: 10/12/2007);

Z Corporation. **Low-Cost 3D Printer.** Informação sobre equipamentos.
Disponível em: <<http://www.zcorp.com>> (Acesso em: 10/03/2008).