JOSÉ LEONARDO OTERO NETO

Adequação da tecnologia de modelagem tridimensional física
computadorizada na obtenção de modelos de aparência
voltados para o ensino de projeto em design de produto

Dissertação apresentada à Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de
São Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Ciências.

Área de concentração:
Design e Arquitetura

Orientador:
Prof. Dr. Luís Cláudio Portugal do Nascimento

EXEMPLAR REVISADO E ALTERADO EM RELAÇÃO À VERSÃO ORIGINAL,
SOB RESPONSABILIDADE DO AUTOR E ANUÊNCIA DO ORIENTADOR.
A versão original, em formato digital, ficará arquivada na biblioteca da faculdade.
São Paulo, 22 de agosto de 2017.

São Paulo
2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço Técnico de Biblioteca
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

Otero Neto, José Leonardo

Adequação da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada na obtenção de modelos de aparência voltados para o ensino de projeto em design de produto / José Leonardo Otero Neto; orientador Luís Cláudio Portugal do Nascimento. - São Paulo, 2017.
180p.

Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Área de concentração: Design e Arquitetura.

1. Design. 2. Design de Produtos. 3. Ensino. 4. Modelos.
I. Portugal do Nascimento, Luís Cláudio, orient. II. Título.

Nome: OTERO NETO, José Leonardo

Título: Adequação da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada na obtenção de modelos de aparência voltados para o ensino de projeto em design de produto

Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 12 de julho de 2017

Banca Examinadora

Prof. Dr. Luís Cláudio Portugal do Nascimento

Instituição: FAU USP

Julgamento: Aprovado

Assinatura:

Prof. Dr. Ricardo Nakamura

Instituição: Escola Politécnica - USP

Julgamento: Aprovado

Assinatura:

Prof^a. Dr^a. Maria Gabriela Caffarena Celani

Instituição: UNICAMP

Julgamento: Aprovado

Assinatura:

Resumo

OTERO NETO, J. L. **Adequação da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada na obtenção de modelos de aparência voltados para o ensino de projeto em design de produtos.** 2017. 180 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

A disponibilização de uma tecnologia de desenvolvimento recente, denominada neste trabalho de “tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada”, ofereceu novos recursos para a obtenção de representações utilizadas no processo de desenvolvimento de projetos de produtos (modelos), que anteriormente era realizado utilizando-se exclusivamente procedimentos manuais de caráter artesanal.

No entanto, existe uma diversidade de processos e de equipamentos que a utilizam, variando entre alguns simples e baratos, que podem obter objetos com algumas restrições, como de geometria, acabamento e resistência, e outros, extremamente complexos, que podem fornecer objetos com características excepcionais.

Por outro lado, são utilizados diversos tipos de modelos ao longo do processo de projeto: alguns muito simples, empregados nas fases iniciais, e outros de maior complexidade, que representam o produto nas fases finais de seu desenvolvimento, entre os quais se encontra o modelo de aparência, que apresenta grande potencial de se beneficiar, em seu processo de confecção, das características particulares da referida tecnologia.

O presente trabalho tem, portanto, o objetivo de descrever as características formais e construtivas do modelo de aparência a partir de pesquisa bibliográfica e observações e de apresentar um quadro detalhado da disponibilidade da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada, particularmente no contexto brasileiro, a partir de pesquisa realizada com fabricantes, representantes comerciais, institutos de pesquisa e escolas de design, de forma a identificar processos, equipamentos e procedimentos que podem ser adequados para atender a demanda por esse tipo de modelo gerada por disciplinas de projeto de produto em cursos de design.

Palavras-chave: design, design de produtos, modelo tridimensional físico, modelo de aparência, prototipagem rápida.

Abstract

OTERO NETO, J. L. Adequacy of computer-aided technology of physical three-dimensional modeling to produce mock-ups used in the teaching of design methodology in product design. 2017. 180 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

The availability of a new development technology, which in this text is referred to as "computer-aided technology of physical three-dimensional modeling", provides new resources for making representations used in product design development process (models), which previously, was almost exclusively completed through manual procedures.

However, there are various types of processes and equipment that use the technology which range from simple and inexpensive, that can obtain objects with some restrictions, such as geometry, finishing and resistance, and others that are extremely complex, that can provide objects with exceptional features.

On the other hand, several types of models are used throughout the design process: some very simple, utilized in the early stages, and others of greater complexity, which represents the product in the final stages of its development, such as the mock-ups that have the greatest potential to benefit from the special characteristics of the technology previously mentioned.

The objective of this research is to describe the formal and constructive characteristics of the mock-ups, based on bibliographic research and observations and present a detailed picture of what is available for computerized three-dimensional modeling technology focused within the context of Brazil, based on research carried out with manufacturers, commercial representatives, institutes, research and design schools, in order to identify processes, equipment and procedures that may be appropriate to meet the demand for this type of model in design schools.

Keywords: design, product design, prototype, mock-up, rapid prototyping

Lista de siglas

3DP:	<i>"Tree Dimensional Priting"</i>
ABS:	<i>"Acrylonitrile Butadiene Styrene"</i>
AM:	<i>"Additive Manufacturing"</i>
ASA:	<i>"Acrilonitrila Estireno Acrilato"</i>
CAD:	<i>"Computer Aided-Design"</i>
CAM:	<i>"Computer Aided-Manufacturing"</i>
CJP:	<i>"Color Jet Printing"</i>
CNC:	<i>"Computer Numeric Control"</i>
CPE:	<i>"Chlorinated polyethylene"</i>
DDM:	<i>"Direct Digital Manufacturing"</i>
DLP:	<i>"Digital Light Processing"</i>
DMP:	<i>"Direct Metal Printing"</i>
DMLS:	<i>"Direct Metal Laser Sintering"</i>
EBM:	<i>"Electron Beam Melting"</i>
FDM:	<i>"Fusion Deposition Modeling"</i>
LOM:	<i>"Laminated Object Manufacturing"</i>
LPF:	<i>"Laser Powder Forming"</i>
MDF:	<i>"Medium Density Fiber"</i>
MIT:	<i>"Massachusetts Institute of Technology"</i>
MJM:	<i>"Multi-jet Modeling"</i>
MJP:	<i>"Mult-jet Printing"</i>
NC:	<i>"Numeric Control"</i>
PC:	<i>"Polycarbonate"</i>
PET:	<i>"Polyethylene Terephthalate"</i>
PETG:	<i>"Polyethylene Terephthalate Glycol-modified"</i>
PLA:	<i>"Polylactic acid"</i>
PPSF:	<i>"Polyphenylsulfone"</i>
PVC:	<i>"Polyvinyl chloride"</i>
RP:	<i>"Rapid Prototyping"</i>
SLA:	<i>"Stereolithography Apparatus"</i>
SLM:	<i>"Select Laser Melting"</i>
SLS:	<i>"Selective Laser Sintering"</i>

SRP *“Subtractive Rapid Prototyping”*

TPU: *“Thermoplastic Polyurethane”*

Lista de Figuras

Figura 1	Modelo de plataforma de petróleo.....	18
Figura 2	Estudo para um triciclo de cargas.....	18
Figura 3	Maquete de residência confeccionada em 1996.....	19
Figura 4	Meios de representação utilizados na Olympia.....	32
Figura 5	Exemplo de lista de requisitos de projeto	35
Figura 6	Modelos utilizados no desenvolvimento do projeto de escova de dentes.....	47
Figura 7	Geração de conceitos para relógio esportivo.....	48
Figura 8	O processo de convergência controlada.....	49
Figura 9	Exemplo de geração de alternativas de configuração.....	50
Figura 10	Exemplos de rascunhos tridimensionais.....	51
Figura 11	Exemplos de rascunhos tridimensionais.....	51
Figura 12	Estudo bidimensional para avaliar a movimentação de várias configurações de um mecanismo de alavanca.....	52
Figura 13	Modelo funcional construído para avaliar componentes do mecanismo utilizado no projeto de um espremedor de laranja.....	53
Figura 14	Modelo em espuma e madeira do mecanismo utilizado no desenvolvimento do projeto de um espremedor de laranja..	53
Figura 15	Configuração final para o produto espremedor de laranja da OrangeX.....	54
Figura 16	Modelos volumétricos de câmera fotográfica.....	55
Figura 17	Modelo funcional de uma escavadeira e desenvolvimentos posteriores.....	56
Figura 18	Modelo funcional construído para verificar as condições de operação de um tomógrafo portátil dentro de um centro cirúrgico e modelo de aparência.....	56
Figura 19	Modelo feito de MDF e espumas para avaliações ergonômicas de uma cadeira de hospital.....	57

Figura 20	“Mock up” de terminal de autoatendimento em uma agência de correios.....	57
Figura 21	Modelo de aparência em escala 1:7.....	58
Figura 22	Modelo de aparência e produto apresentados no Salão do Automóvel em 2010.....	59
Figura 23	Modelo de aparência de telefone celular.....	62
Figura 24	Peça obtida por impressora “desktop”.....	70
Figura 25	Peça obtida por processo de jateamento de fotopolímero ...	70
Figura 26	Fresadora Roland MDX 40.....	72
Figura 27	Classificação de tecnologias de modelagem tridimensional física computadorizada proposta pelo autor.....	72
Figura 28	Modelo de veículo blindado em escala 1:5.....	76
Figura 29	Maquete do Portão de Brandemburgo e microestrutura mecânica obtida pelo processo de polimerização por dois fótons (2PP) da Nanoscribe.....	77
Figura 30	Exemplo de peça obtida por equipamento da Stratasys que deposita múltiplos materiais simultaneamente.....	77
Figura 31	Peça obtida em impressora tipo “desktop” utilizando filamento de PLA.....	88
Figura 32	Impressora tipo “faça você mesmo”.....	89
Figura 33	Exemplos de impressoras tipo “desktop” que utilizam processo FDM.....	91
Figura 34	Impressora CubePro Duo da 3D Systems.....	92
Figura 35	Peça obtida em impressora “desktop” Formlabs Fom 1.....	94
Figura 36	Impressora SLA “botton up” Fom 2 da Formlabs.....	95
Figura 37	Impressora DLP da B9 Creator.....	96
Figura 38	Impressora Carbon 3D.....	97
Figura 39	Peça obtida em impressora Formlabs Fom 1.....	98
Figura 40	Impressora tridimensional Mojo, da Stratasys.....	102

Figura 41	Impressora tridimensional uPrint SE, da Stratasys.....	103
Figura 42	Linha de impressoras Dimension, da Stratasys.....	103
Figura 43	Linha de impressoras Fortus, da Stratasys.....	104
Figura 44	Impressora Objet 260 Connex 3, da Stratasys.....	106
Figura 45	Modelo obtido pela impressora “ <i>multi-material</i> ” colorida Objet 260 Connex 3, da Stratasys.....	108
Figura 46	Objeto obtido pela impressora “ <i>multi-material</i> ” colorida J750, da Stratasys.....	108
Figura 47	Peça obtida pelo equipamento de estereolitografia ProX 950, da 3D Systems.....	110
Figura 48	Impressora Projet 1200, da 3D Systems.....	111
Figura 49	Impressora ProX 950, da 3D Systems.....	111
Figura 50	Peça obtida na impressora Projet 350 SD, da 3D Systems..	112
Figura 51	Impressora ProX 950, da 3D Systems.....	113
Figura 52	Bonecos obtidos a partir de digitalização tridimensional e impressora CJP, da 3D Systems.....	114
Figura 53	Modelo de aparência do tênis DMK, da Reebok, obtido em impressora CJP.....	114
Figura 54	Impressora sPro™ 60 HD, da 3D Systems, que utiliza o processo SLS.....	115
Figura 55	Protótipo funcional de furadeira orbital.....	116
Figura 56	Impressoras em metal EOS M 400	118
Figura 57	Exemplo de peça obtida por impressão tridimensional em metal.....	119
Figura 58	Suporte de dobradiça utilizado no projeto do Airbus A320...	120
Figura 59	Outro exemplo de design otimizado.....	121
Figura 60	Central de usinagem ROMI.....	122
Figura 61	Fresadora CNC tipo pórtico	123
Figura 62	Fresadora CNC “ <i>desktop</i> ” da Roland.....	124

Figura 63	Exemplo de peça de paredes finas usinada em equipamento CNC de três eixos.....	127
Figura 64	Equipamento de corte a laser da Universal.....	128
Figura 65	Modelo de roda de bicicleta.....	132
Figura 66	Modelo de bicicleta confeccionado utilizando-se processo Polyjet, da Stratasys.....	133
Figura 67	Modelo de aparência de furadeira obtido pelo equipamento Objet 260 Connex 3, da Stratasys.....	134
Figura 68	Modelo de aparência de capacete de ciclista obtido pelo processo Polyjet, da Stratasys.....	135
Figura 69	Modelo de um conjunto automotivo obtido pelo processo CJP, da 3D Systems.....	136
Figura 70	Modelos de aparência obtidos por processos automatizados.....	136
Figura 71	Modelo de aparência de uma embarcação.....	139
Figura 72	Modelo de cafeteira obtido por processo aditivo.....	140
Figura 73	Reprodução da arma utilizada pelo personagem Han Solo no filme <i>Star Wars</i>	141
Figura 74	Modelo de aparência de telefone celular.....	142
Figura 75	Processo de confecção de modelo de apresentação de drone	143
Figura 76	Modelo de apresentação de drone	144
Figura 77	Acabamento realizado em peça obtida por impressora “ <i>desktop</i> ” com pronunciado “efeito escada”.....	145
Figura 78	Exemplo de peça de geometria complexa obtida por impressora “ <i>desktop</i> ”.....	146
Figura 79	Exemplos de peça de geometria complexa obtida por equipamento Dimension Elite, da Stratasys, que utiliza o processo FDM.....	147

Figura 80	Exemplos de peças de geometria complexa obtidas por equipamento da linha MJM, da 3D Systems, que utiliza o processo de jateamento de fotopolímero.....	147
Figura 81	Exemplos de peças de geometria complexa obtida por equipamento da linha Objet, da Stratasys, que utiliza o processo de jateamento de fotopolímero.....	148
Figura 82	Modelo de aparência obtido utilizando o processo CJP, da 3D Systems.....	148
Figura 83	Ilustração esquemática do processo de estereolitografia.....	158
Figura 84	Peça obtida pelo equipamento de estereolitografia ProX 950, da 3D Systems.....	158
Figura 85	Ilustração esquemática do processo de Sinterização Seletiva a Laser (SLS).....	161
Figura 86	Peça obtida pelo equipamento SLS sPro 230, da 3D Systems.....	161
Figura 87	Ilustração esquemática do processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM).....	163
Figura 88	Peça obtida pelo equipamento FDM Dimension Elite, da Stratasys.....	163
Figura 89	Ilustração esquemática do processo de Manufatura Laminar de objetos (LOM).....	165
Figura 90	Processo de remoção do material excedente de uma peça obtida por equipamento LOM.....	166
Figura 91	Ilustração esquemática do processo Thermojet da Solidscape Inc.....	167
Figura 92	Peça obtida pelo equipamento Thermojet, da Solidscape....	168
Figura 93	Ilustração esquemática do processo Polijet.....	169
Figura 94	Peças com diversas cores e diversos materiais obtidas pelo equipamento Objet 260 Connex 3, da Stratasys.....	170
Figura 95	Ilustração esquemática do processo CJP.....	172
Figura 96	Peça obtida pelo equipamento CJP, da 3D Systems.....	172
Figura 97	Ilustração esquemática do processo Lens, da Optomec.....	174

Figura 98	Componente de turbina produzido pelo processo LPF, da Optomec.....	174
Figura 99	Peças em titânio produzidas pelo processo LPF.....	175

Sumário

Capítulo 1: Caracterização geral da pesquisa

1.1.	Introdução e justificativa	17
1.2.	Questão fundamental	21
1.3.	Objetivos	21
1.3.1.	Objetivo geral	21
1.3.2.	Objetivos específicos	21
1.4.	Definições de termos e conceitos-chave.....	22
1.5.	Delimitações do estudo.....	23
1.5.1	Sequência de recortes que delimitam o objeto de pesquisa.....	24
1.5.1.1.	Plano de fundo.....	24
1.5.1.2.	Primeiro recorte: processo de desenvolvimento de projetos de produtos.....	24
1.5.1.3.	Segundo recorte: disciplinas de projeto de produto.....	25
1.5.1.4	Terceiro recorte: modelos de aparência.....	25
1.6.	Pressuposições	26

Capítulo 2: Referencial teórico

2.1.	Introdução	28
2.2.	Caracterização conceitual sobre métodos sistemáticos de projeto em design de produto.....	28
2.2.1.	Breve perspectiva histórica	28
2.2.2.	Metodologia prática e metodologia teórica	31
2.3.	A estrutura inerente aos métodos sistemáticos de projeto em design de produtos	33
2.4.	Resumo	37

Capítulo 3: Materiais e métodos

3.1.	Questão fundamental.....	39
3.1.1.	Subproblema 1.....	39
3.1.2.	Subproblema 2.....	41
3.1.3.	Subproblema 3.....	43

Capítulo 4: Resultados

4.1.	A utilização de modelos tridimensionais físicos como meio de representação no desenvolvimento de projetos de produtos.....	44
4.1.1.	O conceito de modelo como meio de representação	44
4.1.2.	Características de utilização dos modelos tridimensionais físicos no desenvolvimento de projetos de produtos	46
4.1.3.	O elenco de modelos utilizados ao longo de uma sequência esquemática de projeto	48
4.1.4.	Principais tipos de modelos tridimensionais físicos utilizados no desenvolvimento de projetos de produtos.....	54
4.1.5.	Características formais e construtivas do modelo de aparência.....	59
4.1.6.	Resumo	63
4.2.	A tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada.....	65
4.2.1.	Introdução.....	65
4.2.2.	Origens e desenvolvimento.....	65
4.2.3.	Proposta de classificação	68
4.2.4.	Características, potencialidades e limitações da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada.....	73
4.2.4.1.	Vantagens e limitações dos processos por adição de camadas.....	75
4.2.4.2.	Vantagens e limitações dos processos por subtração.....	79
4.2.5.	Necessidade de competência técnico-operacional para utilizar programas CAD	82

4.2.6.	Panorama atual e disponibilidade de tecnologias e equipamentos de modelagem tridimensional física computadorizada atualmente no Brasil.....	87
4.2.6.1.	Processos aditivos	87
4.2.6.1.1.	Impressoras tridimensionais “ <i>desktop</i> ”.....	88
4.2.6.1.2.	Equipamentos para prototipagem e produção.....	100
4.2.6.1.2.1.	Stratasys	100
4.2.6.1.2.2.	3D Systems.....	109
4.2.6.1.3.	Impressoras em metal.....	117
4.2.6.2.	Processos subtrativos.....	122
4.2.6.2.1.	Usinagem CNC.....	122
4.2.6.2.2.	Corte a laser	127
4.2.7.	Resumo	128
4.3.	A utilização da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada para atender a demanda de modelos de aparência gerada por exercícios de projeto voltados para o ensino em design de produto.....	131
4.3.1.	Introdução	131
4.3.2.	Ponto de inflexão.....	132
4.3.3.	Recursos “ <i>high end</i> ” para obter modelos de aparência de forma automatizada.....	134
4.3.4.	Rotas alternativas para atender à demanda de modelos de aparência gerada por exercícios de projeto em escolas de design.....	137
4.3.5.	Tecnologias adequadas ao nível de complexidade de cada componente do modelo.....	141
4.3.6.	Proposta de abordagem para utilização de tecnologias de modelagem tridimensional física computadorizada na confecção de modelos de aparência no contexto de exercícios de projeto voltados para o ensino em design de produtos.....	149
	Capítulo 5: Conclusão.....	152

Apêndice 1: Descrição dos principais processos da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada baseados em adição de material.....	157
--	-----

REFERÊNCIAS.....	176
-------------------------	-----

Capítulo 1: Caracterização geral da pesquisa

1.1. Introdução e justificativa

Esta pesquisa apresentada nesta dissertação de mestrado foi motivada pelo desenvolvimento e disponibilização de uma nova tecnologia, denominada neste trabalho de “tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada”, que incorporou novos recursos ao processo de confecção de representações tridimensionais físicas (modelos) utilizadas no desenvolvimento de projetos de produtos.

A técnica de que se dispunha anteriormente utilizava exclusivamente procedimentos manuais, de caráter artesanal, empregando uma grande variedade de ferramentas manuais (como réguas, esquadros, estiletes e formões) e máquinas manuais e estacionárias, em geral oriundas da marcenaria, tais como serra circular, serra de fita, serra tico-tico, lixadeira, furadeira e torno.

O profissional que se dedicava a essa atividade deveria apresentar grande habilidade para trabalhos manuais, e, em geral, a produção era lenta e apresentava, muitas vezes, resultado precário em termos da qualidade de representação.

Nos anos entre o fim do século XX e o início do século XXI, começaram a se popularizar os primeiros equipamentos de modelagem tridimensional física computadorizada. Inicialmente, surgiram empresas que ofereciam serviços de corte a laser, que se mostraram muito úteis para a confecção de maquetes de arquitetura. Atualmente, as impressoras tridimensionais de diversos tipos estão bastante difundidas e existe oferta de equipamentos de usinagem CNC, especialmente fresadoras, de preços e dimensões variadas.

Essa oferta de novos recursos modificou de forma significativa a atividade de confeccionar modelos tridimensionais físicos, com impacto direto na qualidade da representação e na velocidade do trabalho. Inúmeras situações que antes não podiam ser atendidas pelas ferramentas disponíveis, ou envolviam muitas e muitas horas de trabalho, ou, na melhor das hipóteses, seriam atendidas apenas

se o material ou componente fosse encontrado pronto no comércio (*“ready made”*) passaram a ser resolvidas rapidamente por corte a laser, usinagem CNC ou por impressão tridimensional.

Figura 1 - Modelo de plataforma de petróleo confeccionada em 1998.

A construção desse modelo foi muito facilitada porque, após pesquisa em lojas especializadas, foi encontrado um kit para montar de plataforma de petróleo, exatamente na escala necessária, o que forneceu grande quantidade de peças que foram utilizadas, como as duas gruas que se observam na fotografia. Recursos de modelagem tridimensional física computadorizada viabilizariam uma construção como esta sem que fosse necessário recorrer ao *“ready made”*.

Fonte: modelo confeccionado pelo autor e foto do autor.

Figura 2 - Estudo para um triciclo de cargas. A confecção deste modelo também foi muito facilitada pela aquisição, em loja de brinquedos, de uma bicicleta de brinquedo, que forneceu um conjunto de componentes: selim, pedais, manopla e rodas.

Fonte: projeto, modelo e foto do autor.

Figura 3 - Maquete de residência confeccionada em 1996.

A simulação de “elemento vazado”, à esquerda, foi feita a partir de um escorredor de arroz encontrado em supermercados. As portas e janelas foram cortadas à mão, e o resultado é bastante precário em termos da qualidade da representação. Todas essas situações (elemento vazado, portas e janelas) poderiam ser atendidas por corte a laser, conferindo qualidade e velocidade ao trabalho.

Fonte: projeto, modelo e foto do autor.

As Figuras 1, 2 e 3 mostram três exemplos de modelos, confeccionados pelo autor na década de 1990, que apresentaram situações que só puderam ser atendidas porque foi realizada pesquisa no comércio e foram encontradas peças e componentes que foram aproveitados. Com os recursos disponíveis atualmente, tais componentes poderiam ser facilmente obtidos.

A disponibilização de novos recursos representou, sem dúvida, grande contribuição à técnica que até então era empregada na confecção de modelos. No entanto, para que seja possível utilizá-los, é necessário investimento (em conhecimentos, equipamentos e procedimentos), e sempre haverá alternativas que devem ser cuidadosamente avaliadas.

Por exemplo, a utilização de uma máquina de corte a laser na confecção de uma maquete de arquitetura pode tornar o processo de corte das peças incrivelmente rápido e preciso, mas torna-se necessário desenhar em computador todas as peças

que seriam cortadas, o que poderia ser feito a partir de desenhos técnicos bidimensionais (plantas, cortes e fachadas), acompanhados de um processo de identificação e localização dessas peças no modelo. Também seria possível utilizar softwares que realizam esse processo de forma automatizada, mas exigiria a elaboração de modelo virtual tridimensional (modelo CAD 3D).

Ainda seria possível realizar uma impressão tridimensional integral de todo o modelo, mas seria necessário modelo CAD ainda mais sofisticado (“modelo à prova d’água”) e implicaria na utilização de equipamento de complexidade tecnológica e custos superiores.

Dependendo da complexidade do modelo, esta etapa inicial (desenho bidimensional ou modelagem tridimensional virtual), que se faz necessária, pode se tornar muito demorada, o que, no cômputo geral, pode tornar o processo todo até mais lento do que se feito manualmente, da forma tradicional.

Também é preciso avaliar se existe disponibilidade de perícia técnica e operacional para utilizar programas CAD, ou de habilidades artesanais para realizar uma etapa posterior de montagem, e ainda se as despesas geradas pelo investimento no equipamento ou pela terceirização dos serviços de corte ou impressão podem ser comportadas pelo orçamento disponível.

Então se conclui que é necessário, antes de tudo, um planejamento cuidadoso e indicação criteriosa de que recursos serão empregados em que situação.

O objetivo deste trabalho de pesquisa foi, portanto, realizar uma análise, a partir da descrição das características construtivas de um tipo particular de modelo tridimensional físico, denominado “modelo de aparência”, e do estudo das possibilidades técnicas de toda a variedade de processos e equipamentos de modelagem tridimensional física computadorizada, que torne possível utilizar o recurso que se disponibiliza, para atender a demanda por este tipo de modelo, gerada por exercícios de projeto de produto em escolas de design, obtendo os possíveis benefícios e otimizando o investimento necessário.

1.2. Questão fundamental

Esta pesquisa foi norteada pela seguinte questão fundamental:

Como a tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada, em sua variedade de processos e equipamentos, pode ser adequadamente empregada para atender a demanda por modelos de aparência, gerada por disciplinas de projeto de produto em escolas de design, visando obter os possíveis benefícios na qualidade de representação, além de otimizar prazos e custos?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Contribuir para a sistematização do emprego de tecnologias de modelagem tridimensional física computadorizada no contexto de exercícios de projeto de produto em escolas de design.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Determinar as características construtivas do assim chamado “modelo de aparência” a partir da descrição das suas características formais.
- b) Elaborar um quadro detalhado da variedade de processos e equipamentos que utilizam a tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada e que se encontram disponíveis atualmente no Brasil.
- c) Identificar processos e equipamentos baseados na referida tecnologia, assim como procedimentos de utilização que se mostrem mais adequados para atender a demanda por modelos de aparência gerada por exercícios de projeto em escolas de design.

1.4. Definições de termos e conceitos-chave

Modelo: em sentido amplo, qualquer forma de representação pode ser considerada como um tipo de modelo.

Modelo tridimensional físico: tipo específico de modelo utilizado no desenvolvimento de projetos de produtos.

Protótipo: tipo específico de modelo tridimensional físico que reproduz o produto em condições de uso. São utilizados para avaliar funcionamento, operação e aparência de um produto simultaneamente, ou seja, seu desempenho geral. Em autores de língua inglesa, a palavra “*prototype*” geralmente é traduzida como “protótipo”, no entanto, a palavra “modelo” também é uma tradução válida, e em muitos casos seria mais adequada.

Modelo de aparência: (também chamado de modelo de representação visual ou modelo de apresentação) tipo específico de modelo tridimensional físico que reproduz fielmente a aparência do produto acabado. Por definição, o modelo de aparência perfeito é aquele que, após exclusivamente a observação, não é possível diferenciar se se trata de modelo ou produto. Em termos práticos, esse nível de realismo é muito difícil, se não impossível, de obter, e na maioria das vezes, ao se observar um modelo desse tipo, percebe-se que se trata de uma simulação (Figura 22, página 59).

Programas CAD: sistemas utilizados para obter modelos bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D) assistidos por computador.

Modelo CAD 3D: tipo de modelo obtido por programa CAD que simula a tridimensionalidade. Também chamados de modelo digital, modelo virtual ou modelo matemático.

Equipamentos de modelagem tridimensional física computadorizada: (neste trabalho também denominados “equipamentos de modelagem computadorizada”) equipamentos controlados por informações armazenadas em computador. Utilizam

código alfanumérico que pode ser gerado diretamente, a partir da digitação de linhas de comando, ou automaticamente, a partir de um modelo CAD 3D. São divididos em equipamentos baseados em procedimentos subtrativos (por exemplo: fresadoras) ou aditivos (por exemplo: impressão tridimensional).

1.5. Delimitações do estudo

Este estudo limita-se a identificar equipamentos e procedimentos adequados à confecção de modelos de aparência no contexto de disciplinas de projeto de produto em escolas de design. Ressalta-se, portanto, que não houve a intenção de identificar a totalidade de possibilidades de aplicações da referida tecnologia para fins didáticos e pedagógicos, que, acredita-se, pode ir além da confecção de determinado tipo de representação.

Essa delimitação foi imposta ao estudo por se considerar que este tipo de modelo abordado com maior atenção, o modelo de aparência, apresenta características que o tornam exemplar.

Em primeiro lugar, foi observado que o modelo de aparência é um tipo de modelo amplamente utilizado em exercícios curriculares para disciplinas de projeto de produto.

Em segundo lugar, devido às suas características formais, que visam representar com fidelidade a aparência do produto acabado, é uma situação que apresenta, de forma recorrente, a necessidade de representar geometrias complexas com grande precisão. Essa necessidade é, em muitos casos, muito difícil, se não impossível, de ser atendida utilizando as técnicas tradicionais, baseadas em procedimentos artesanais, e é uma situação que pode se beneficiar em grande medida das novas possibilidades decorrentes do desenvolvimento da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada.

Também se considerou que não é comum, em exercícios realizados em disciplinas de projeto de produto (que normalmente têm duração de 16 semanas ao longo de um semestre letivo), atingir um nível de desenvolvimento que justifique a construção

de protótipo. No entanto, este também é um tipo de modelo que pode ser muito beneficiado pela utilização da tecnologia em estudo na sua construção, e será abordado, ainda que brevemente.

1.5.1. Sequência de recortes que delimitam o objeto de pesquisa

Será descrita a seguir a sequência de recortes a incidir neste estudo de forma a delimitar o objeto de pesquisa.

1.5.1.1. Plano de fundo

O panorama amplo no qual a pesquisa se insere sugere a aplicabilidade de uma tecnologia de desenvolvimento recente (a tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada) às diversas áreas do conhecimento.

1.5.1.2. Primeiro recorte: processo de desenvolvimento de projetos de produtos

A tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada possui um desenvolvimento relativamente recente e tornou-se mais acessível a partir da última década do século XX. Ela tem despertado grande interesse e tem se mostrado útil a diversas áreas do conhecimento, tais como:

- medicina;
- odontologia;
- arqueologia;
- engenharia;
- arquitetura;
- design (especialmente em projeto de produtos).

O primeiro recorte, portanto, foi definido em torno da utilidade da referida tecnologia no processo de desenvolvimento de projeto de produtos.

1.5.1.3. Segundo recorte: disciplinas de projeto de produto

O processo de desenvolvimento de projeto de produtos pode ocorrer em diversas situações, tais como:

- na indústria;
- em escritórios de design;
- em escolas de design.

O segundo recorte, portanto, foi definido em torno das situações de desenvolvimento de projeto de produtos que ocorrem em escolas de design, em especial em disciplinas que visam exercitar o processo de projeto por meio de exercício(s) prático(s), denominadas disciplinas de projeto de produto.

1.5.1.4. Terceiro recorte: modelos de aparência

As disciplinas de projeto de produto são disciplinas que têm a intenção de instrumentalizar o aluno com conhecimentos a respeito de metodologia de projeto.

Como será mostrado com mais detalhes mais adiante, metodologia de projeto, em linhas gerais, significa que o projeto será desenvolvido de uma forma organizada, partindo de questões mais amplas e abstratas e evoluindo em complexidade em direção a questões mais específicas e concretas, terminando com a construção e o teste do protótipo.

Ao longo desse processo utiliza-se uma variedade de tipos de modelos tridimensionais, cada qual com características específicas, tais como:

- rascunhos tridimensionais;
- estudos volumétricos;
- modelos de aparência;
- protótipos.

O elenco de modelos tridimensionais utilizados ao longo do processo de projeto de produtos também evolui em complexidade, ou seja, os modelos utilizados nas

fases iniciais abordam aspectos gerais da conformação espacial de determinados conceitos e, portanto, não exigem grande precisão na representação de suas formas que ainda estão em processo de definição.

Na medida em que o projeto avança e decisões são tomadas, surge a necessidade de se obter representações mais precisas da geometria do produto em desenvolvimento, para que se possam realizar avaliações mais específicas.

Como também será mostrado com mais detalhes mais adiante, a tecnologia em estudo tem como principais características:

- liberdade formal, ou seja, possibilidade de obter qualquer geometria, até as mais complexas;
- alta precisão em relação às predefinições realizadas no modelo virtual.

O terceiro recorte foi definido, portanto, em torno dos modelos utilizados nas fases finais do processo de projeto, notadamente modelos de aparência, tendo em vista que este tipo de modelo é amplamente utilizado em exercícios de disciplinas de projeto de produto e apresentam, de forma recorrente, situações em que é necessário representar geometrias complexas com grande precisão.

1.6. Pressuposições

A pesquisa realizada partiu dos seguintes pressupostos:

- a) A utilização de métodos sistemáticos no processo de desenvolvimento de projeto de produtos determina a utilização de um elenco de tipos de modelos tridimensionais físicos, entre os quais se encontra o modelo de aparência.
- b) Modelos de aparência apresentam interesse para exercícios de projeto de produto em escolas de design.
- c) A demanda por modelos de aparência gerada por exercícios de projeto de produto em escolas de design possui as seguintes características:

- necessidade de obter certa quantidade de modelos (a quantidade exata depende do número de alunos do curso);
- cada modelo deve representar um projeto diferente (portanto, cada qual deve apresentar características particulares);
- todos os modelos devem ser produzidos no mesmo intervalo de tempo (tendo em vista que a data de entrega é a mesma para todos os estudantes).

d) Considerou-se, ainda, como pressuposto que sobre essa demanda, caracterizada acima, incidem os seguintes requisitos imperativos:

- é necessário minimizar custos, na medida do possível;
- é necessário otimizar prazos;
- é necessário atender a exigências rigorosas de qualidade de representação.

Capítulo 2: Quadro referencial teórico

2.1. Introdução

Tal como observado no Capítulo 1, a pesquisa realizada partiu do pressuposto de que a aplicação de métodos sistemáticos de projeto em design de produtos determina a utilização de uma variedade de tipos de modelos tridimensionais físicos. O objetivo deste capítulo é apresentar o quadro referencial teórico que permite identificar a estrutura esquemática inerente ao processo de projeto assim orientado. No Capítulo 4 serão apontados os meios de representação tipicamente empregados em cada fase, destacando-se os principais tipos de modelos tridimensionais físicos que são utilizados.

2.2. Caracterização conceitual sobre métodos sistemáticos de projeto em design de produtos

2.2.1. Breve perspectiva histórica

A ideia de que é possível sistematizar os procedimentos de projeto a partir de princípios gerais que possam ser aplicados a qualquer situação particular tem sido perseguida desde tempos remotos.

O *“Dez livros sobre a arte da construção”*, do artista e engenheiro-construtor Vitruvius (por volta de 80-10 a.C.), é considerado “um dos primeiros e mais completos trabalhos sobre regras do projeto e da configuração” (Bürdek, 2006, p.17).

Foi com a revolução industrial, a partir do fim do século XVIII, quando se tornou mais acentuada a divisão do trabalho entre o projeto e a manufatura (HESKETT, 2006), que surgiu um novo profissional especializado nos procedimentos de projeto de produtos e a discussão sobre seus métodos de trabalho tornou-se mais relevante.

A Bauhaus, instituição de ensino fundada em 1919 em Weimar, na Alemanha, a partir da tentativa de integrar arte e produção industrial, deu origem a importantes

reflexões sobre o processo de projeto e é apontada por Heskett (2003, p.103) como “a fonte do moderno desenho industrial”.

O impulso decisivo aconteceu na década de 1960, após a Segunda Guerra Mundial, quando ocorreu grande desenvolvimento econômico nos países industrializados da Europa, que rapidamente levou a uma guerra de concorrência internacional. Tal situação exigiu que as empresas racionalizassem o projeto e a produção e também que os designers abandonassem métodos de configuração subjetivos e emocionais originários da manufatura para que fossem aceitos como parceiros comprometidos com os objetivos empresariais (BÜRDEK, 2006).

A Escola de Ulm, na Alemanha (entre 1952 e 1968), ocupou-se desse tema com intensidade e com estreita relação com a indústria alemã da época (ibid.).

A primeira fase da tentativa de organizar uma metodologia de projeto em design de produtos foi denominada de “paradigma analítico”, que incorporava o racionalismo ao design originário das ciências formais da matemática e da lógica (ibid.).

Essa abordagem, que, “em termos gerais, trata-se de uma construção estruturalista, conjugando componentes analíticos com componentes normativos” (Bonsiepe, 2012, p.92), mostrou-se extremamente eficiente para solucionar problemas complexos, como aqueles decorrentes do programa espacial, e possibilitou atingir, de forma espetacular, os objetivos colocados pelo brevíssimo “*briefing*” enunciado durante um discurso do presidente John F. Kennedy em 1961: “antes do fim da década, colocar um homem na lua e trazê-lo de volta em segurança” (Cross, 2008, p.12, tradução do autor).

No final dos anos 1970 iniciou-se uma mudança que passou a ter significado efetivo para o design nos anos 1980 (BÜRDEK, 2006). O ponto de vista de determinados grupos de consumidores torna-se o centro das preocupações e os procedimentos de projeto passam a procurar soluções específicas para casos particulares, conforme está colocado no trecho a seguir:

[...] por meio dos pós-modernos, novas tendências do design foram propagadas. Neste momento uma mudança de paradigmas na metodologia

de design também ficou evidente: até os anos 70 os métodos empregados eram orientados na sua maioria dedutivamente, isto é, era desenvolvida para um problema geral uma solução especial (de fora para dentro). No novo design, trabalhava-se de forma mais indutiva, isto significa perguntar para quem (para que grupo específico) um projeto especial deva ser colocado no mercado (de dentro para fora) (Bürdek, 2006, p.257).

Observa-se que atualmente existe uma variedade de fatores que são considerados imprescindíveis e que não eram antes contemplados por aquilo que Bonsiepe (2012) chama de metodologia clássica, entre os quais ele destaca:

- a contaminação ambiental;
- o uso de recursos não renováveis;
- o consumo de energia durante o ciclo completo do produto;
- o emprego de mão de obra em lugar de bens de capital;
- o respeito a certas minorias, como idosos e portadores de necessidades especiais;
- diferenças regionais.

Como se vê, a metodologia de projeto, à medida que se estabeleceu como disciplina autônoma, passou a incorporar fatores adicionais, adaptando-se às circunstâncias históricas nas últimas décadas.

Observa-se um consenso entre os autores consultados em relação a que, diante do atual nível de desenvolvimento tecnológico, é impraticável desenvolver projetos de produtos sem contar com uma reflexão de ordem metodológica que oriente o projeto para seus objetivos.

Bonsiepe aponta que o grande furor dos anos 1960 e 1970 deu lugar a considerações mais comedidas. Mas não nega a validade de um conhecimento que atribui ao design de produtos um aspecto concreto e “permite captar melhor a natureza do processo projetual, libertando-o das suas escoras da intuição, despersonalizando-o; em suma: objetivando-o” (id., 1978, p.145).

Munari (1981, p.10) também reconhece a necessidade da metodologia de projeto: “o método de projeto não é mais do que uma série de operações necessárias, dispostas em ordem lógica ditada pela experiência. Seu objetivo é o de atingir o melhor resultado com o menor esforço”.

Cross (2008, p.45) afirma que “todos os proponentes de novos métodos de processos de design concordam que existe uma necessidade de aperfeiçoar a forma tradicional de trabalho em design”, e aponta as seguintes razões:

- aumento da complexidade do design moderno;
- novos problemas (materiais, dispositivos): a experiência prévia do designer pode ser irrelevante;
- necessidade de trabalhar em equipe devido à complexidade dos problemas;
- altos riscos e custos associados;
- necessidade de reduzir o tempo de projeto.

Para os objetivos desta pesquisa, tendo observado a necessidade da metodologia de projeto, interessa compreender qual a sua estrutura para identificar a forma como ela se utilizada dos meios de representação e, em especial, das representações tridimensionais físicas.

2.2.2. Metodologia prática e metodologia teórica

O desenvolvimento de projeto de produtos está inserido em um planejamento de curto, médio e longo prazo que tem o objetivo primordial de retornar e remunerar o capital investido, pois só assim o ciclo se reinicia e a empresa permanece no mercado. O produto é apenas um meio para atingir esse fim. Projetar produtos que cumpram essa função, o que faz dele um sucesso comercial, é o objetivo do designer e do método de projeto (BAXTER, 2000).

Portanto, as empresas que permanecem no mercado dependem da eficiência do seu processo de design para assegurar sua existência. Na busca dessa eficiência, desenvolvem uma expertise e uma tradição que determinam como seus produtos devem ser projetados.

Considerando todos os tipos de produtos e de empresas que existem em todos os nichos de mercado, parece improvável que seja possível enunciar procedimentos de projeto válidos para todas elas.

Löbach (2001) apresenta um quadro bastante detalhado de quatro empresas que atuam no mercado alemão, destacando as características do processo de projeto de cada uma.

Figura 4 - Meios de representação utilizados na Olympia (Alemanha).
Observa-se que o método de desenvolvimento de projeto da empresa é fortemente baseado na construção e análise de modelos tridimensionais físicos. Fonte: Löbach, 2001, p.129.

Fica evidente que a Rosenthal, que atua na área de porcelana e cristais para uso doméstico e possui um processo de projeto que visa desenvolver diversas variações de forma a partir de uma ideia e nunca realiza testes com protótipos, tem pouco em comum, por exemplo, com a Olympia, que atua na área de máquinas e sistemas para escritórios e possui um processo de projeto fortemente apoiado em etapas de construção e análise de modelos tridimensionais físicos (Figura 4).

As peculiaridades das diversas situações de projeto criam um distanciamento entre as situações práticas e as tentativas de criar teorias de caráter geral.

A distância entre a metodologia teórica e a prática de projeto é apontada na citação a seguir:

Tenha-se presente que existe um hiato entre a metodologia projetual como metalinguagem e sua aplicação prática e que se deve diferenciar claramente entre a complexidade do comportamento projetual real e a relativa simplicidade das recomendações metodológicas. (Bonsiepe 1978, p.147)

Apesar desse distanciamento, observa-se que diversos autores (BONSIEPE, 1978; LÖBACH, 2001; BURDEK, 2006; CROSS, 2008) concordam que o estudo sobre metodologia teórica tem grande interesse para fins didáticos e, conseqüentemente, pedagógicos e acadêmicos. Por meio dos estudos sobre metodologia de projeto torna-se possível ensinar e aprender design, conforme se observa na citação a seguir:

Por meio de intensa discussão com a metodologia, o design se tornou quase que pela primeira vez ensinável, aprendível e com isto comunicável. [...] Ela tem muito menos o significado de uma patente – um mal entendido que durou muito tempo – e muito mais um significado didático. (Burdek, 2006, p. 226)

Como este trabalho refere-se aos meios de representação utilizados para fins didáticos, será discutida a seguir a estrutura do processo de design de acordo com as considerações dos seguintes teóricos da metodologia de projeto: Baxter (2000), Löbach (2001), Cross (2008) e Bonsiepe (1978; 1984).

2.3. A estrutura inerente aos métodos sistemáticos de projeto em design de produtos

Bonsiepe (1978, p.151) observa que a metodologia de projeto possui aspectos gerais, que ele denomina de “macroestrutura”, que é a “divisão do processo em fases”, e aspectos específicos, que ele denomina de “microestrutura”, que é a “descrição das especificações técnicas empregadas em cada uma das fases”.

Segundo o autor, a macroestrutura tem sido amplamente esclarecida, e existe consenso entre autores de metodologia de projeto a respeito da ordem sequencial do processo e divergências relativas às subdivisões das etapas e suas denominações (ibid.).

Para os objetivos deste trabalho, interessa especialmente a microestrutura da fase de projeto que é caracterizada por um processo de etapas sucessivas de criação de alternativas e redução da variedade (id., 1984), caminhando no sentido de questões mais gerais em direção a questões mais específicas.

Os diversos autores consultados (JONES, 1970; BONSIPE, 1978; LÖBACH, 2001; e CROSS, 2008, que faz referência aos trabalhos de FRENCH, 1999; ARCHER, 1984; e PAHL e BEITS, 1999) concordam que a fase de projeto propriamente dita é precedida de uma fase de formulação do problema de design (problematização), que, por sua vez, é precedida pela percepção de uma necessidade.

Esse momento inicial do projeto de um novo produto pode ocorrer com ou sem a participação de designers. Löbach observa que na atual conjuntura da produção industrial, a tarefa de perceber uma necessidade é conduzida pela direção da empresa ou entregue aos especialistas em pesquisa de mercado. Normalmente, ao designer é entregue a missão de “propor uma solução na forma de produto, para um determinado problema” (Löbach, 2001, p.143).

Então, a partir dessa definição, inicia-se o trabalho de coleta ampla de informações e análise dos numerosos fatores que compõem o problema de design, entre os quais se destacam os seguintes:

- Análise da necessidade;
- Análise da relação social (homem-produto)
- Análise da relação com o ambiente (produto-ambiente)
- Desenvolvimento histórico
- Análise do mercado
- Análise da função (funções práticas)
- Análise estrutural
- Análise da configuração
- Análise de materiais e processos de fabricação
- Patentes legislação e normas
- Análise de sistemas de produtos (produto-produto)
- Distribuição, montagem, serviço a clientes, manutenção.

(ibid., p.142)

A fase de coleta e análise de informações esclarecerá progressivamente o problema em toda a sua extensão, o que permitirá definir os requisitos de projeto, conforme é exemplificado na Figura 5, que mostra uma lista de requisitos de projeto para uma nova cama de hospital infantil.

Condições para a nova cama de hospital infantil

1. Possibilitar a fabricação em série
2. Considerar as cores adequadas a crianças
3. Utilização de um colchão único
4. Possibilitar fabricação simples
5. Proporcionar uma construção estável
6. Possibilitar uma montagem fácil
7. Facilitar o intercâmbio de elementos
8. Procurar utilizar uma altura da superfície da cama adequada ao paciente, ao médico e ao pessoal de apoio
9. Garantir a segurança de funcionamento
10. Colocar alças
11. Evitar que o travesseiro se desloque
12. Possibilitar posição segura dos braços para infusões
13. Evitar quinas e cantos agudos
14. Diminuição do peso total
15. Considerar as possibilidades de armazenagem
16. Considerar um apoio reforçado para a cabeça
17. Considerar um apoio reforçado para as costas
18. Considerar um apoio reforçado para as pernas
19. Considerar um apoio reforçado para os braços
20. Considerar uma superfície da cama basculante
21. Considerar um apoio de pés graduável
22. Considerar um apoio de braços variáveis
23. Incrementar a facilidade de movimento das partes mecânicas
24. Suporte do apoio de cabeça
25. Possibilitar regulação contínua
26. Facilitar a posição dos braços para as infusões
27. Considerar uma superfície da cama interrompida
28. Uso continuado da mesa da cama
29. Considerar o custo dos materiais
30. Considerar os custos de fabricação
31. Facilitar o transporte e o despacho
32. Alcance das superfícies existentes
33. Simplicidade da limpeza da cama
34. Emprego de partes mecânicas livres de manutenção
35. Considerar as recomendações de higiene
36. Considerar a eventual higiene diária na cama
37. Possibilidade de colocação de acessórios
38. Facilitar a capacidade de manobra
39. Possibilidade de armazenagem em espaço mínimo
40. Redução dos ruídos de regulação
41. Considerar a constituição física fraca da criança
42. Considerar a limpeza do chão
43. Considerar as condições de espaço do hospital
44. Utilização dos elementos técnicos mais simples
45. Possibilitar a combinação de cores no hospital
46. Considerar uma combinação de cores adequada à criança
47. Atenção à curiosidade infantil
48. Evitar acessórios que estorvem
49. Possibilidade de uso rápido
50. Evidenciar as funções

Figura 5 - Exemplo de lista de requisitos de projeto, no caso, para uma cama de hospital infantil. Observa-se que todas as questões relativas à fabricação, utilização, operação, aparência, manutenção, transporte etc. devem ser consideradas.

Fonte: Löbach, 2001, p.148.

A definição dos requisitos de projeto encerra a fase de problematização, levantamento e análise e inicia a fase de busca da solução na forma de produto, ou seja, inicia a fase de projeto propriamente dita.

Baxter sugere que a fase de configuração do projeto é precedida por uma fase intermediária na qual já se inicia a busca de soluções, mas, em um primeiro momento, de soluções conceituais. Essa fase é denominada por esse autor de “projeto conceitual”. O objetivo do projeto conceitual pode variar muito devido aos diversos tipos de restrições, conforme é exemplificado no trecho a seguir:

Por exemplo, se for identificada a necessidade de se produzir rapidamente uma versão de baixo custo de um produto já existente, não adianta ficar formulando conceitos inteiramente novos [...]. Se, ao contrário, todos os produtos da empresa não estiverem satisfazendo as necessidades do consumidor, então é necessário repensar a política de design adotada pela empresa. (Baxter, 2000, p.175)

A fase de projeto conceitual é altamente criativa, exige intuição, imaginação e raciocínio lógico, e também utiliza métodos estruturados (para realizar a análise da tarefa, análise das funções, análise do ciclo de vida, análise de valores) e deve considerar questões de aparência com suas características de estilo e com seus aspectos semânticos e simbólicos (ibid.).

Pode ser subdividida em três subfases: definição dos objetivos do projeto conceitual, geração de alternativa e seleção de conceito. A seleção do conceito pode ser feita utilizando o processo de “convergência controlada” (ibid.), ilustrado na Figura 8, página 49, que permite que o conceito escolhido seja constituído de vários aspectos positivos presentes nos diferentes conceitos apresentados inicialmente.

A seleção do conceito encerra a fase de projeto conceitual, dando início à fase de configuração do projeto. Na Tabela 1 é apresentado um resumo desta fase segundo os autores estudados. Como observado acima, existem divergências relativas às subdivisões das etapas e suas denominações, mas, em linhas gerais, existe consenso de que “o processo projetual é um processo iterativo de geração e redução da variedade” (Bonsiepe, 1984, p.37), caminhando no sentido de questões mais gerais em direção a questões mais específicas.

Baxter (2000)	Löbach (2001)	Bonsiepe (1978)
<ul style="list-style-type: none"> - geração de ideias - seleção - análise das possibilidades de falha - construção e teste do protótipo. 	<ul style="list-style-type: none"> - geração, (inclui a definição do conceito) - geração de alternativas de configuração. - avaliação - realização do projeto 	<p>Anteprojeto</p> <ul style="list-style-type: none"> - geração de alternativas <p>Projeto</p> <ul style="list-style-type: none"> - avaliação, decisão, escolha - realização - análise final da solução

Tabela 1 - Subdivisão da fase de configuração segundo autores consultados.

A fase final é determinada pela construção do protótipo (produto em condições de uso), seguida de testes e aperfeiçoamentos. As modificações no protótipo são a última possibilidade de realizar alterações no projeto (ANDRADE, 1988).

Caso o protótipo seja aprovado pela direção da empresa, tem início a fase de produção. Antes do início da produção comercial, é realizada uma pré-produção de poucas unidades, chamadas de cabeça de série (LÖBACH, 2001), para avaliar e ajustar a linha de produção.

2.4. Resumo

a) O interesse por métodos sistemáticos de projeto acentuou-se com a divisão do trabalho entre projeto e manufatura que ocorreu com a Revolução Industrial e teve impulso decisivo depois da Segunda Guerra Mundial com o forte desenvolvimento econômico em países industrializados. A metodologia de projeto desenvolveu-se, sobretudo, a partir do pós-guerra e adaptou-se ao contexto histórico.

b) Estudos teóricos sobre metodologia de projeto e a tentativa de formular uma estrutura geral do processo podem resultar em esquemas demasiadamente genéricos e abstratos e parecer ao designer experiente um tanto confuso e descolado da atividade cotidiana em determinado segmento da indústria ou em determinada empresa.

Entretanto, existe grande interesse acadêmico em estudos sobre metodologia teórica, porque ela possui um caráter didático que viabiliza a comunicação e,

portanto, o ensino do processo de projeto a estudantes de design ao longo da sua formação.

c) Por razões metodológicas, o desenvolvimento do projeto caminha a partir de questões iniciais mais genéricas e, à medida que o projeto avança, aborda questões cada vez mais específicas, e nesse processo ele inclui, em síntese, as seguintes etapas:

- percepção de uma necessidade;
- definição do problema;
- coleta e análise de informações;
- elaboração dos requisitos de projeto;
- definição do conceito;
- geração e escolha de uma alternativa de configuração;
- coleta de informações parciais;
- construção e teste do protótipo.

No Capítulo 4 serão apresentados os meios de representação tipicamente utilizados em cada fase, destacando-se os principais tipos de modelos tridimensionais físicos utilizados e suas características.

Capítulo 3: Materiais e métodos

3.1. Questão fundamental

Esta pesquisa foi norteadada pela seguinte questão fundamental:

Como a tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada, em sua variedade de processos e equipamentos, pode ser adequadamente empregada para atender a demanda por modelos de aparência, gerada por disciplinas de projeto de produto em escolas de design, visando obter os possíveis benefícios na qualidade de representação, além de otimizar prazos e custos?

Serão descritos a seguir os subproblemas que foram identificados a partir da questão fundamental, juntamente com os dados que foram considerados necessários à investigação de cada um deles, as fontes onde esses dados foram coletados, as técnicas de coleta e tratamento, assim como indagações formuladas previamente (indagações exploratórias) com a intenção de orientar o processo de pesquisa.

3.1.1. Subproblema 1

De que forma os modelos de aparência devem ser confeccionados (características construtivas) para que se obtenham as características formais necessárias?

a) Dados necessários:

- características de utilização de modelos tridimensionais físicos no desenvolvimento de projetos de produtos;
- características formais do modelo de aparência;
- características construtivas do modelo de aparência.

b) Fonte de dados:

- bibliografia relativa à metodologia de projeto e, particularmente, sobre sua relação com meios de representação;
- bibliografia sobre casos de desenvolvimento de projeto de produto;

- feiras e exposições de produtos;
- disciplinas de projeto de produto em cursos de design;
- outras situações de confecção de modelos de aparência.

c) Técnica de coleta:

- revisão bibliográfica: seleção de trechos em que se faz referência a características de utilização de modelos em processos de projeto, tipos de modelos utilizados, características formais e construtivas dos diversos tipos de modelos, em especial do modelo de aparência, seleção de fotografias de modelos utilizados em processos de projeto;
- registro fotográfico de modelos de produtos em exposições e feiras;
- registro fotográfico do processo de confecção dos modelos utilizados em disciplinas de projeto de produto e em outras situações.

d) Técnica de tratamento:

- agrupamento dos trechos selecionados em bibliografia de forma a identificar diversos pontos de vista sobre as características de utilização de modelos tridimensionais físicos em processos de projeto de produto;
- agrupamento dos trechos selecionados em bibliografia de forma a identificar características formais e construtivas dos diversos tipos de modelo utilizados em processos de projeto, em especial do modelo de aparência;
- agrupamento de fotografias do autor e coletadas em bibliografia por tipos de modelos;
- descrição de características formais e construtivas dos tipos de modelos, especialmente do modelo de aparência, apontadas por autores e observadas nos casos coletados.

e) Indagações exploratórias:

- Como se dá a relação entre metodologia de projeto e os meios de representação utilizados ao longo do processo de desenvolvimento do projeto?
- Quais os meios de representação que se utilizam?
- Quais as características dos modelos como meio de representação?
- Quais os principais tipos de modelos que se utilizam e quais suas características formais?

- De que forma os modelos tridimensionais físicos devem ser construídos para que se obtenham as características formais necessárias?

3.1.2. Subproblema 2

Quais as características notáveis da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada em termos gerais e quais as características particulares dos diversos processos e equipamentos?

a) Dados necessários:

- características conceituais da referida tecnologia em termos gerais;
- possibilidades de aplicação e limitações em termos gerais;
- características da disponibilidade da tecnologia no Brasil;
- variedade de processos disponíveis;
- vantagens e desvantagens de cada processo;
- aplicações típicas de cada processo;
- custos envolvidos.

b) Fonte de dados:

- bibliografia;
- fabricantes e representantes comerciais;
- oficinas de escolas de design e institutos de pesquisa;
- usuários;
- feiras, conferências e exposições;
- blogs e sites na internet.

c) Técnica de coleta:

- revisão bibliográfica: seleção de trechos em que se descrevem os diversos processos; seleção de trechos em que se faz referência a vantagens e limitações em termos gerais e particulares dos processos e equipamentos;
- entrevistas com fabricantes, vendedores, técnicos e usuários dos diversos processos e equipamentos;
- observação e registro em fotografia e vídeo de equipamentos em uso;
- buscas em websites de fabricantes e em blogs de usuário de equipamentos.

d) Técnica de tratamento:

- seleção de trechos de livros em que se descrevem os diversos processos;
- seleção de trechos de livros que fazem referência a vantagens e limitações em termos gerais e em cada caso em particular;
- transcrição e impressão de entrevistas e depoimentos coletados e seleção de trechos que fazem referência a vantagens e limitações em termos gerais e particulares de cada processo e equipamento;
- impressão de fotografias, do autor e coletadas em livros e websites de fabricantes, que mostram bons resultados e problemas observados durante a operação de equipamentos e nas peças obtidas;
- agrupamento de trechos de livros, de trechos de entrevistas, trechos de depoimentos e fotografias em função de características positivas e negativas apontadas em termos gerais e particulares de cada processo e equipamento.

e) Indagações exploratórias:

Em termos gerais:

- Quais são os antecedentes?
- Em que os novos processos diferem dos processos tradicionais?
- Quais as vantagens decorrentes dessas diferenças?
- Quais as implicações negativas?
- Quais são as novas possibilidades que se descortinam?

Em relação a cada processo e equipamento em particular:

- Quais os custos envolvidos (aquisição, operação e manutenção)?
- Que processos se mostram mais rápidos? E mais lentos?
- Que processos apresentam logística mais complicada?
- Que processos apresentam operação mais segura?
- Como se dá a manutenção dos equipamentos?
- Como se dá o treinamento da mão de obra?
- Quais as características das peças obtidas por cada processo?

3.1.3. Subproblema 3

De que forma a tecnologia em questão (Subproblema 2) pode ser adequadamente utilizada para obter um tipo particular de modelo tridimensional físico, o modelo de aparência (Subproblema 1), no contexto particular de disciplinas de projeto de produto em escolas de design, de forma a obter possíveis benefícios na qualidade de representação, além de otimizar prazos e custos?

a) Dados necessários: resultados das análises produzidas nos subproblemas 1 e 2.

b) Fonte de dados: subproblemas 1 e 2.

c) Técnica de coleta: não se aplica.

d) Técnica de tratamento: foi realizado cotejamento entre os subproblemas 1 e 2, de forma a identificar processos, equipamentos e procedimentos que possibilitem atender às circunstâncias determinadas pelo subproblema 3.

e) Indagações exploratórias:

- Como deve se dar a integração da tecnologia em estudo com os recursos técnicos utilizados até então para obter modelos de aparência?
- Essa integração é necessária? A tecnologia em estudo é realmente útil para obter modelos de aparência utilizados para fins didáticos?
- Essa integração se dá de forma complementar? A tecnologia em estudo se combina com a técnica corrente com vantagens?
- Essa integração se dá de forma substitutiva? A tecnologia em estudo torna os recursos técnicos disponíveis até então obsoletos?
- A tecnologia em estudo possibilita resultados que antes eram impossíveis de se obter com os recursos técnicos disponíveis?

Capítulo 4 – Resultados

4.1. A utilização de modelos tridimensionais físicos no desenvolvimento de projetos de produtos

4.1.1. O conceito de modelo como meio de representação

O conceito de modelo é bastante amplo, e pode-se dizer que é utilizado pela totalidade das áreas do conhecimento. É possível falar em modelo matemático, modelo físico, modelo biológico, modelo químico, modelo bioquímico, modelo filosófico, modelo de sociedade, modelo de conduta diante da sociedade etc.

Marcial Echenique, ao estudar a utilização do conceito de modelo para ser aplicado à ideia de um modelo matemático da estrutura espacial urbana que pudesse ser manipulado por meios computacionais, lançou-se na tarefa de definir o conceito geral de modelo. Suas reflexões serão utilizadas para apontar características abstratas desse conceito, e em seguida serão observadas características da sua aplicação no caso concreto do desenvolvimento de projetos de produtos.

Segundo a definição desse autor, “toda representação é um modelo e o seu objetivo é prover um quadro simplificado e inteligível da realidade com o objetivo de compreendê-la melhor” (Echenique, 1975, p.17, tradução do autor).

Para chegar a esta ideia de modelo como meio de representação, o autor parte de outro conceito mais amplo, que é o de “sistema”, que, segundo ele, é bastante conhecido como “um todo complexo ou um conjunto de elementos ou partes interconectadas” (ibid., p.13, tradução do autor).

Por “representação” o autor entende que se trata da “expressão de certas características relevantes da realidade observada, incluindo os objetos, como sistemas que existem, existiram ou poderão existir” (ibid., p.17, tradução do autor).

Essa definição ampliada engloba qualquer instrumento que traduz informações obtidas a partir de uma realidade objetiva, que pode ser um gráfico, uma tabela, um mapa, um esboço, um desenho, um objeto, entre outros.

O fato de o modelo ser uma representação implica que ele é necessariamente impreciso: “se não fosse impreciso, o modelo seria a própria realidade e não uma representação” (ibid., p.19, tradução do autor).

Portanto, o conceito de modelo é útil para representar aspectos relevantes da realidade com o objetivo de estudá-la, o que deve ser feito com um propósito, conforme se destaca a seguir: “O sistema é estudado com certo propósito em mente; tudo aquilo que não cumpre esse propósito é eliminado” (Apostel, 1961 *apud* Echenique, 1975, p.17, tradução do autor).

O propósito é determinado por um problema identificado na realidade observada. Em outras palavras: “Os problemas, para cuja resolução se desenha o modelo, determinam a seleção das suas características” (Echenique, 1975, p.17, tradução do autor).

Ainda segundo o autor, a seleção dos próprios problemas dependerá da capacidade e treinamento de quem faz os modelos, dos recursos de que dispõe e dos fins que se perseguem (ibid.).

Em resumo, destacam-se as seguintes características gerais do conceito de modelo, que também estão presentes quando ele é utilizado no desenvolvimento de projeto de produtos:

- meio de representação de um sistema que pode vir a existir;
- imprecisão;
- simplificação com o objetivo de facilitar a compreensão; atenção a determinado aspecto que se destaca em determinado momento, em detrimento dos demais;
- dependência das habilidades de quem faz o modelo, dos recursos disponíveis e dos fins que se persegue.

Essas características gerais também são observadas no caso concreto da utilização de modelos tridimensionais físicos em processos de desenvolvimento de projetos de produtos mediante a utilização de métodos sistemáticos de projeto.

4.1.2. Características de utilização dos modelos tridimensionais físicos no desenvolvimento de projetos de produtos

As representações tridimensionais físicas têm importância central no processo de desenvolvimento do projeto de produtos. Em diversas situações de projeto, são utilizadas para aprendizado, comunicação, integração da equipe de desenvolvimento e também como marco de projeto (ULRICH; EPPINGER, 2012).

Alexandre (1992) observa que, diante do atual quadro de desenvolvimento tecnológico, é impraticável desenvolver qualquer tipo de produto sem auxílio de modelos.

No entanto, segundo o mesmo autor, vários equívocos podem estar associados ao uso de modelos em processos de projeto, o que pode comprometer possíveis benefícios, conforme observa: “o uso inadequado de modelos pode ser tão prejudicial quanto a sua ausência” (ibid., p.7).

Por exemplo, Baxter (2000) aponta que muitos designers confeccionam um modelo ao fim de determinadas etapas como forma de demonstrar que atingiram determinado estágio. Contudo, se não existem informações claras as quais se buscam, tal atitude pode resultar em atrasos e desviar a atenção do grupo, que poderia estar concentrado em atividades mais urgentes.

Por esta razão, o mesmo autor considera a seguinte regra geral em relação à construção de modelos: só faça se for necessário, após esgotar todas as outras fontes de informação e apenas com a complexidade necessária para obter a informação que se procura (ibid.).

No sentido de evitar equívocos, Alexandre (1992) também aponta que não existe um modelo polivalente que forneça todas as informações necessárias. Esse modelo

seria o protótipo. Mas ele só pode ser construído ao fim do projeto, quando tudo estiver definido. O mesmo autor observa também que não é possível construir o protótipo na medida em que o projeto avança, porque isso “nos induz a adotar soluções ditadas pelo modelo em vez de produzir modelos que respeitem as soluções determinadas pelo projeto” (ibid., p.7).

Portanto, para evitar equívocos e assegurar que o esforço de confecção do modelo resultará em benefícios ao projeto, é necessário manter um vínculo estreito entre o tipo de modelo e o método de projeto que se utiliza, como Alexandre (ibid., p.8) aponta a seguir: “É preciso entender que existe um tipo de modelo adequado a cada etapa de projeto, de acordo com o método de projeto utilizado”.

Como observado no Capítulo 2, por razões metodológicas, o desenvolvimento do projeto caminha a partir de questões iniciais mais genéricas, e à medida que o projeto avança, aborda questões cada vez mais específicas. Os modelos utilizados no desenvolvimento do projeto também respeitam essa lógica e evoluem em complexidade, conforme se observa na citação a seguir:

[...] os protótipos devem ser simples e baratos nos estágios iniciais do desenvolvimento, quando se tem pouca certeza da viabilidade comercial do produto. [...] À medida que o produto se desenvolve, as informações aumentam e os riscos tendem a diminuir. Surge necessidade também de resposta a questões mais específicas. Neste ponto pode-se aumentar a sofisticação e a complexidade dos protótipos. (Baxter, 2000, p.244-245)

Hallgrimsson também observa, no trecho transcrito a seguir, a forma como os modelos tridimensionais físicos evoluem em complexidade:

Examinando as muitas iterações da escova de dentes abaixo, é óbvio que os modelos iniciais demonstram opções para a forma geral, enquanto mais adiante modelos mais robustos, em materiais mais exatos, incluem detalhes de cores e texturas. (Hallgrimsson, 2012, p.12-13, tradução do autor)

Figura 6 - Modelos utilizados no desenvolvimento do projeto de escova de dentes. Observa-se como os modelos evoluem em complexidade à medida que o projeto avança. Fonte: Hallgrimsson, 2012, p.12-13.

Serão apresentados a seguir os principais tipos de modelos tridimensionais físicos utilizados ao longo de uma sequência esquemática de projeto, assim como suas principais características, de acordo com os autores consultados, tendo em vista a ideia de que esse elenco de modelos evolui em complexidade, desde modelos muito simples até outros que incluem todas as características formais, funcionais e operacionais do produto.

4.1.3. O elenco de modelos utilizados ao longo de uma sequência esquemática de projeto

Figura 7 - Geração de conceitos para relógio esportivo.
Fonte: Bjornlund *et al.*, 2001, p.57.

Como observado no Capítulo 2, no processo de desenvolvimento do projeto de um produto, a fase de projeto propriamente dita ocorre após uma fase inicial de problematização, coleta e análise de informações. Em seguida inicia-se uma fase

de procura de possíveis soluções conceituais para o futuro produto, onde surgem as primeiras imagens.

Devido ao caráter de divergência (JONES, 1970) dessa fase (geração de muitos conceitos bastante distintos entre si), é mais frequente utilizar o desenho como meio de representação (que, de acordo com a definição adotada, também pode ser considerado um tipo de modelo) que proporciona agilidade para uma investigação preliminar.

O tipo de desenho que possui características próprias: não é um desenho que pretende ser uma ilustração, são rabiscos iniciais de ideias experimentais “que não se destinam à comunicação com quem quer que seja. Essencialmente eles são comunicações com si próprio, um tipo de pensamento em voz alta” (Cross, 2008, p.9).

Figura 8 - O processo de convergência controlada na seleção do conceito.
Fonte: Baxter, 2000, p.195.

A seleção do conceito pode ser feita utilizando o processo de “convergência controlada, pelo qual um conjunto de conceitos gerados vai convergindo sistematicamente, em um único conceito selecionado” (Baxter, 2000, p.195). Esse processo é apresentado na Figura 8.

A escolha do conceito finaliza a fase de projeto conceitual e dá início à fase de configuração, que, por sua vez, se inicia com o conceito escolhido e termina com a construção e teste do protótipo (ibid.).

Após essa fase de divergência (geração de conceitos) e convergência (escolha do conceito), segue-se uma nova fase de divergência na qual serão avaliadas diversas possibilidades de configuração para o conceito escolhido.

Figura 9 - Exemplo de geração de alternativas de configuração para um conceito de relógio esportivo.
Fonte: Bjornlund *et al.*, 2001, p.58.

Nessa fase, a utilização de desenhos também pode ser intensa, mas agora com características de ilustração, onde é possível entender claramente diferenças sutis na forma de cada proposta, tal como está exemplificado na Figura 9.

Paralelamente aos desenhos, iniciam-se estudos com modelos tridimensionais de baixa complexidade, para os quais foram encontradas diversas denominações na bibliografia consultada: modelo de estudo preliminar, rascunhos tridimensionais, modelos rápidos e sujos, “monstrinhos”, modelos de baixa fidelidade.

Segundo Andrade (1988, p.97), modelos preliminares possibilitam análises formais e volumétricas que “podem confrontar a configuração obtida com aquela imaginada e pretendida quando da definição do perfil do produto, durante a conceituação geral do mesmo”. Ainda segundo Andrade (ibid.), modelos preliminares apresentam as seguintes características:

- são elementos simples na sua construção;
- expressam as ideias iniciais do projeto;
- são modelos grosseiros (sem rigor dimensional);
- podem ser feitos de qualquer material de fácil manuseio e que não requeiram instrumental especial;
- podem incorporar apenas um único traço do projeto total (pode haver a necessidade de utilizar diversos desses modelos no processo de trabalho).

Figura 10 - Exemplos de rascunhos tridimensionais utilizados para avaliar possíveis configurações de drones produzidos durante a disciplina Projeto de Produto 3 (FAU USP, 1º semestre, 2015).
Fonte: foto do autor.

Figura 11 - Exemplos de rascunhos tridimensionais utilizados para avaliar uma hipótese de configuração para um secador de cabelos. Fonte: Milton e Rodgers, 2013, p.119.

Hallgrimsson utiliza o termo “explorativo” de forma abrangente “para descrever qualquer modelo feito rapidamente para examinar ideias alternativas emergentes” e

ressalta que esse tipo de procedimento “pode frequentemente conduzir a insights inesperados e frutíferos” (Hallgrimsson, 2012, p. 20, tradução do autor).

Na medida em que o projeto avança e são tomadas decisões a respeito da configuração do produto, surge a necessidade de obter informações mais precisas para avaliar questões mais específicas. A natureza da informação específica que será buscada dependerá das características particulares do produto e do conceito escolhido.

Figura 12 - Estudo bidimensional para avaliar a movimentação de várias configurações de um mecanismo de alavanca utilizado como princípio para um espremedor de laranjas.
Fonte: Bjornlund *et al.*, 2001, p.25.

Por exemplo, no projeto de um espremedor de laranja, desenvolvido pela empresa Smart Design LLC, de Nova Iorque, para a indústria OrangeX e que utiliza como conceito uma alavanca que prensa metade da fruta para extrair o suco, foi necessário avaliar inicialmente diversas possibilidades de funcionamento desse mecanismo, o que foi feito confeccionando-se modelos bidimensionais para estudar o movimento do mecanismo (Figura 12).

Em seguida foi construído um modelo tridimensional funcional para avaliar a alavanca e sua pega, assim como a geometria da peça contra a qual a fruta é pressionada (Figura 13). Usuários de todas as idades e tamanhos de mãos foram convidados a experimentar o modelo, o que levou a um refinamento do mecanismo.

Figura 13 - Modelo funcional construído para avaliar componentes do mecanismo utilizado no desenvolvimento do projeto de um espremador de laranja, como comprimento da alavanca e geometria dos componentes. Fonte: Bjornlund *et al.*, 2001, p.26-27.

As informações obtidas dessa forma foram utilizadas para confeccionar modelos tridimensionais em espuma e madeira que possibilitaram avaliar variações do caminho escolhido para refinamento posterior.

Figura 14 - Modelo em espuma e madeira do mecanismo utilizado no desenvolvimento do projeto de um espremador de laranja que gerou novas informações parciais para refinamento posterior. Fonte: Bjornlund *et al.*, 2001, p.25.

O modelo final, mostrado na Figura 14, foi usado para ilustrar a forma e a montagem das peças. Como o peso era uma consideração importante, as peças foram desbastadas para se assemelharem às peças fundidas. Isso permitiu à equipe de projeto estimar o peso final do produto.

Por fim, buscou-se uma forma escultural para a configuração final do produto que integrasse todos os componentes em uma composição fluida (Figura 15).

Figura 15 - Configuração final para o produto espremedor de laranja da OrangeX.
Fonte: Bjornlund *et al.*, 2001, p.24.

Esse exemplo ilustra o fato de que o elenco de modelos que será utilizado, antes de construir o protótipo, que colecionará todas as informações obtidas por avaliações parciais, realizadas a partir de modelos específicos, deverá ser definido em função das características do conceito definido para o produto e do método de projeto empregado em uma situação particular.

4.1.4. Principais tipos de modelos tridimensionais físicos utilizados no desenvolvimento de projetos de produtos

Serão relacionados a seguir alguns exemplos de tipos de modelos tridimensionais físicos, encontrados na bibliografia consultada, que podem ser utilizados para realizar avaliações parciais após a definição do conceito e antes da construção do protótipo.

Ressalta-se que foi observada muita divergência entre os autores e professores de design de produtos consultados em relação aos tipos de modelos existentes e suas denominações.

Por esta razão, optou-se por relacionar apenas alguns exemplos, que podem ser considerados de consenso, tendo em vista que realizar um levantamento abrangente dos tipos de modelos tridimensionais físicos que se utilizam no desenvolvimento de projetos de produtos, e propor uma classificação que possa unificar a terminologia empregada, foge dos objetivos deste trabalho, que tem a intenção de abordar um tipo particular, o modelo de aparência, que será caracterizado a seguir.

Modelos de avaliação preliminar

Já foram caracterizados anteriormente (Figuras 10 e 11, página 51).

Modelo volumétrico

Finalidade: visualizar o caráter formal geral de um projeto, sem precisão de detalhes (BONSIEPE, 1978).

Figura 16 - Modelos volumétricos de câmera fotográfica.
Fonte: Books Nippan Staff (org.), 1993, p.131.

Modelo funcional

Finalidade: verificar o funcionamento de um detalhe ou de todo o produto (BONSIEPE, 1978). Também podem ser utilizados para outros fins, como, por exemplo, avaliar as condições de operação.

Figura 17 - À esquerda, modelo funcional de uma escavadeira e, à direita, desenvolvimentos posteriores. Fonte: Hallgrimsson, 2012, p.8.

Figura 18 - À direita, modelo funcional construído para verificar as condições de operação de um tomógrafo portátil dentro de um centro cirúrgico. À esquerda, modelo de aparência. Fonte: Hallgrimsson, 2012, p.34.

Modelo ergonômico

Finalidade: permitir uma série de avaliações ergonômicas (BONSIEPE, 1978).

Este tipo de modelo é confeccionado com componentes móveis que podem ser colocados em diferentes posições para que usuários em potencial possam experimentar e emitir opiniões sobre as diversas configurações.

Figura 19 - Modelo feito de MDF e espumas para avaliações ergonômicas de uma cadeira de hospital. Fonte: Milton e Rodgers, 2013, p.124.

“Mock up”

O termo *“mock up”* é frequentemente utilizado como sinônimo para a palavra “modelo”, e foi observado que também é utilizado para designar os outros tipos de modelos que estão sendo denominados aqui de estudos volumétricos, modelos de aparência e até mesmo protótipos.

Figura 20 - *“Mock up”* de terminal de autoatendimento em uma agência de correios
Fonte: Hallgrimsson, 2012, p.22.

Mas, em geral, observou-se também uma tendência em considerar esse tipo como um modelo físico em escala natural construído de materiais de fácil manipulação tais como papel cartão, madeira e espumas, com a finalidade de avaliar interação física, escala e proporções da configuração proposta (MILTON; ROGERS, 2013).

Modelo de aparência

Finalidade: comunicar a aparência final do produto (HALLGRIMSSON, 2012) com alto grau de realismo. Também é chamado de modelo de representação visual ou modelo de apresentação. É usual confeccionar o modelo de aparência em escala reduzida para avaliações posteriores por meio de fotografias, onde a noção de escala se perde.

Figura 21 - Modelo de aparência em escala 1:7.
Fonte: Stephan (coord.), 2010, p.115.

Após a coleta de todas as informações parciais necessárias, tem início a fase final, que é a materialização do projeto, concluída com a construção e teste do protótipo, que é o tipo de modelo que incorpora todas as características de funcionamento, operação e aparência do produto.

Será apresentada a seguir uma descrição mais detalhada das características formais do modelo de aparência com a intenção de descrever suas características construtivas, ou seja, procedimentos que devem ser adotados na confecção desse tipo de modelo a fim de obter o resultado formal que se busca.

Como já foi observado, a razão de se concentrar atenção neste tipo de modelo decorre do fato de que a tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada tem como uma de suas principais características, como se verá em detalhes mais adiante, a possibilidade de representar formas complexas com grande precisão, o que se mostra mais útil na confecção de modelos de maior complexidade, tal como também já foi observado, característicos das fases finais do processo de projeto, notadamente modelos de aparência.

4.1.5. Características formais e construtivas do modelo de aparência

Figura 22 - Modelo de aparência e produto apresentados no Salão do Automóvel em 2010. O modelo de aparência perfeito é aquele que, apenas por meio da observação, não é possível identificar se se trata de modelo ou produto. Observa-se que, na prática, esse grau de realismo é muito difícil de obter. Fonte: foto do autor.

Como foi apontado na seção anterior, a característica fundamental do modelo de aparência é o seu alto nível de realismo. Por definição, o modelo de aparência perfeito é aquele que, por meio exclusivamente da observação, não é possível diferenciar se se trata de modelo ou produto. Em termos práticos, esse nível de realismo é muito difícil (senão impossível) de obter, e, na maioria das vezes, ao se observar um modelo desse tipo, percebe-se que se trata de uma simulação (Figura 22).

O modelo de aparência é usado para qualquer situação em que seja necessário comunicar a aparência final do produto, como para a apresentação da equipe de desenvolvimento à direção da empresa, para aprovação, para fins publicitários, como exposição em feiras e fotografia, ou para testes de aceitação junto ao público-alvo (LOBACH, 2001; HALLGRIMSSON, 2012).

Em termos gerais, os modelos de aparência apresentam as seguintes características (MILTON; RODGERS, 2013):

- não possuem nenhuma funcionalidade;
- não possuem componentes internos;
- partes móveis são fixadas em posições típicas ou de maior preferência;
- são modelos frágeis destinados à observação e, portanto, não devem ser manipulados.

Em relação às características formais, observa-se que os seguintes aspectos são preponderantes:

- as formas devem ser precisas, e detalhes como raios, cantos, transições etc. devem ser representados com exatidão (HALLGRIMSSON, 2012);
- detalhes de fabricação como linhas de separação devem estar presentes (ibid.);
- materiais como metal, vidro, borracha, madeira, plásticos etc. devem estar diferenciados; não é necessário utilizar os materiais previstos na produção, mas os materiais utilizados devem ser simulações convincentes;
- acabamentos e texturas obtidos por processo industrial devem ser simulados de forma realista (ibid.);

- as diferenças de cor (inclusive as mais sutis), brilhos (brilhante, opaco, acetinado, perolado etc.) e transparências devem estar presentes;
- gráficos devem estar presentes para acrescentar realismo e para confirmar a posição (ibid.);
- textos devem estar presentes, inclusive respeitando as características da fonte especificada.

Hallgrimsson (ibid.) observa que atualmente, na prática profissional, esse tipo de modelo é quase que exclusivamente obtido a partir de modelos CAD 3D utilizando equipamentos de modelagem tridimensional física computadorizada. O autor aponta que a usinagem CNC de peças em espuma de poliuretano de alta densidade tem sido a abordagem preferida para confeccionar modelos de aparência profissionalmente, porque apresentam alta resolução e excelente acabamento superficial, necessitando de pouco ou nenhum acabamento antes da pintura, mas que também equipamentos que utilizam o procedimento por adição de camadas têm apresentado a mesma qualidade superficial e têm sido utilizados indistintamente.

No entanto, o objetivo deste trabalho não é observar como se dá a obtenção de modelos de aparência na prática profissional, onde os custos envolvidos nem sempre são uma variável crítica, uma vez que serão diluídos nos custos de desenvolvimento de todo o projeto, e se espera que eles sejam pagos pelos lucros obtidos na futura comercialização do produto.

No caso da obtenção de modelos de aparência no contexto de disciplinas de projeto de produto em cursos de design, é necessário atender à demanda e minimizar os custos, que serão arcados pelo aluno ou pela escola sem perspectiva de retorno.

Hallgrimsson (ibid.) propõe uma sequência de fluxo de trabalho para a atividade de confecção de modelos tridimensionais de qualquer tipo. Destacam-se a seguir as recomendações que podem ser aplicadas ao caso de confecção de modelos de aparência e auxiliar a atingir o objetivo colocado anteriormente.

Planejamento

Segundo o autor, na confecção de modelos mais avançados, como modelos de aparência, vários materiais e processos tendem a ser combinados. Portanto, no processo de planejamento é necessário definir que peças precisam ser feitas e como, o que significa dizer que o objeto final que se pretende obter deve ser considerado, se possível, como um conjunto de peças ou subsistemas que podem ser desmembrados e confeccionados separadamente.

Preparação

O autor observa que é comum utilizar uma mistura de peças feitas à mão e por equipamentos computadorizados. Portanto, tendo definido, no planejamento, quais são os componentes e como serão obtidos, é necessário produzir desenhos técnicos para peças que serão feitas à mão e modelos CAD 3D para as peças que serão obtidas por equipamentos de modelagem tridimensional computadorizada.

Produção das peças

Desmembrar o modelo em peças que são confeccionadas separadamente oferece a grande vantagem de permitir que cada peça receba acabamento separadamente. Portanto, cores, brilhos e texturas podem ser obtidos individualmente em cada peça, evitando a necessidade de criar máscaras, o que resultaria em trabalho adicional e conduziria a resultados mais precários (ibid.).

Figura 23 - À esquerda: conjunto de componentes que foram obtidos separadamente e posteriormente montados para obter modelo de aparência de telefone celular (à direita).

Fonte: modelo confeccionado pelo autor e foto do autor.

Montagem

Durante a montagem final do modelo de aparência é possível utilizar diversos tipos de adesivos, como cianocrilato, cola quente ou fitas adesivas dupla face.

O processo de desmembrar os modelos em diversos componentes oferece ainda a possibilidade de manter alguns deles apenas encaixados na montagem final e, desta forma, permitir a troca por outros componentes, possibilitando avaliar algumas variações de cor, textura, volume etc. (ibid.).

A possibilidade de desmembrar o modelo em componentes que serão confeccionados separadamente e posteriormente montados é uma característica que se beneficia da precisão inerente aos processos de modelagem tridimensional física computadorizada e pode auxiliar na otimização de prazos e custos relativos à obtenção de modelos de aparência no contexto de exercícios de projeto de produtos em escolas de design, tendo em vista que torna possível utilizar recursos mais simples para obter componentes mais simples, e recursos mais sofisticados para obter geometrias mais complexas.

4.1.6. Resumo

a) O conceito geral de modelo como meio de representação apresenta as seguintes características notáveis, que também estão presentes quando ele é aplicado ao processo de desenvolvimento de produtos:

- imprecisão;
- simplificação com o objetivo de facilitar a compreensão; atenção a determinado aspecto que se destaca em determinado momento em detrimento dos demais;
- dependência das habilidades de quem faz o modelo, dos recursos disponíveis e dos fins que se persegue.

b) Os modelos tridimensionais físicos têm importância central no processo de desenvolvimento de projeto de produtos, e destacam-se as seguintes características:

- é utilizado um elenco de tipos de modelos tridimensionais físicos ao longo do processo de desenvolvimento do projeto;

- esse elenco evolui em complexidade ao longo do processo;
- o conjunto de modelos tridimensionais físicos utilizados em um caso específico de desenvolvimento de projeto depende das características do produto, do conceito escolhido e da metodologia utilizada.

Destacou-se que existe muita divergência entre os autores e professores de design de produtos consultados em relação aos tipos de modelos existentes e suas denominações. Foram citados os seguintes tipos como exemplos:

- modelos de avaliação preliminar;
- modelo volumétrico;
- modelo funcional;
- modelo ergonômico;
- *“mock up”*;
- modelo de aparência;

c) Uma característica construtiva dos modelos de aparência, considerada importante para os objetivos deste estudo, é a possibilidade de desmembrar o modelo de aparência, durante o processo inicial de planejamento, em componentes, ou subsistemas de componentes, que devem ser obtidos separadamente e, posteriormente, montados.

4.2. A tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada

4.2.1. Introdução

Um desenvolvimento tecnológico que se iniciou na década de 1940, antes do final da Segunda Guerra Mundial, levou à disponibilidade, nos dias atuais, de ampla variedade de equipamentos com capacidade de transpor representações realizadas em computador para objetos tridimensionais reais.

Essa tecnologia tem despertado grande interesse e vem sendo empregada em diversas áreas, tais como Medicina, Odontologia, Engenharia e Arqueologia.

Em design de produto, que é o foco desta pesquisa de mestrado, ela tem sido considerada uma forma alternativa de obter representações tridimensionais (modelos) de produtos em desenvolvimento, o que antes era feito utilizando-se exclusivamente procedimentos de caráter artesanal.

O objetivo deste subcapítulo é apresentar um quadro geral dessa tecnologia, denominada “tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada”, destacando sua evolução, a variedade disponível, possíveis classificações, bem como suas potencialidades e limitações, a fim de identificar processos e equipamentos e procedimentos adequados para atender a demanda por modelos de aparência gerada por disciplinas de projeto de produto em escolas de design.

4.2.2. Origens e desenvolvimento

A tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada de que se dispõe atualmente começou a dar seus primeiros passos no final da Segunda Guerra Mundial, como se verá a seguir.

No entanto, esse desenvolvimento é decorrência de pesquisas sobre a produtividade industrial, que sempre existiram, com o objetivo de potencializar os benefícios da lógica capitalista, onde o custo individual do produto é inversamente proporcional à escala da produção.

Mas limitações de ordem tecnológica faziam com que a qualidade da produção decaísse na medida em que aumentava o volume devido aos fatores humanos envolvidos (NANFARA; UCCELO; MURPHY, 1995).

Foi durante o esforço de guerra americano na Segunda Guerra Mundial que ficou evidente a incapacidade dos industriais da época em atender os requisitos de qualidade e quantidade simultaneamente. As máquinas utilizadas até então podiam proporcionar qualidade superior, mas não altos volumes (ibid.).

A força aérea americana procurou combater esse problema, para assegurar que todos os aviões americanos fossem fabricados de forma idêntica, convidando várias empresas para desenvolver e fabricar sistemas de controle numérico (NC, da sigla em inglês) (ibid.).

Portanto, desde o início do desenvolvimento dessa tecnologia havia o objetivo de:

- aumentar a produção;
- aperfeiçoar a qualidade e precisão das partes manufaturadas;
- estabilizar os custos de manufatura;
- manufaturar formas complexas (ibid.).

A partir dessas pesquisas, em 1952, o MIT (Massachusetts Institute of Technology) criou a primeira máquina-ferramenta de três eixos controlada numericamente por um processador alimentado por uma fita perfurada com código binário (ibid.), dando início à primeira geração de máquinas NC.

Por volta de 1960, o NC era amplamente aceito e prontamente disponível. Nos anos 1970, a máquina passou a ser controlada diretamente por computador, devido ao aumento da sua capacidade de armazenar e processar dados (ibid.).

Surgiu, então, o controle numérico computadorizado (CNC, da sigla em inglês). Assim, eliminou-se a fita de papel, e a programação da máquina passou a ser feita diretamente no chão de fábrica por intermédio de um sistema de código específico. (ibid.)

O código específico utilizado (inicialmente numérico, e posteriormente alfa numérico) era constituído de linhas de comando que podiam ser obtidas digitando-as manualmente ou utilizando-se programas de edição, o que tornava muito trabalhosa a tarefa de programação de geometrias mais complexas, o que, por sua vez, limitava a complexidade geométrica das peças produzidas e também fazia com que o esforço de programação se justificasse apenas para uma determinada escala de produção (OVERBY, 2011).

Posteriormente, a utilização de programas CAD e CAM (*“Computer Aided-Design”* e *“Computer Aided-Manufacturing”*) tornou possível gerar o código necessário de forma automática a partir de gráficos baseados em vetor (ibid.), praticamente eliminando o trabalho de programação e viabilizando a utilização dessa tecnologia para a obtenção de peças únicas com alta complexidade geométrica.

Atualmente existe uma grande variedade de equipamentos CNC associados a processos industriais de conformação, corte, usinagem, união e acabamento (IRONS, 2007).

Devido a suas características que possibilitam a transposição de um modelo virtual para uma peça real de forma automatizada, a usinagem CNC foi considerada, no contexto desta pesquisa, como uma modalidade da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada.

Pesquisas posteriores utilizaram o CNC juntamente de outras tecnologias acessórias tradicionais e de desenvolvimento mais recentes, tais como metalurgia do pó, solda, extrusão, controles de movimento de alta precisão, laser, jateamento tipo *“inkjet”*, além de novos materiais (VOLPATO, 2007), para a obtenção de uma segunda modalidade da referida tecnologia, que também possibilita a obtenção de objetos tridimensionais a partir de representações realizadas em computador, mas, neste caso, por um processo que se caracteriza pela sobreposição de camadas planas.

Será apresentada a seguir uma discussão sobre a terminologia utilizada para designar as subcategorias da tecnologia em estudo, bem como uma proposta de classificação baseada nas características de cada processo e das peças obtidas.

4.2.3. Proposta de classificação

Como caracterizado anteriormente, o objeto deste estudo é a tecnologia que possibilita a obtenção de objetos tridimensionais reais a partir de representações virtuais realizadas em computador, denominada de “tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada”.

Observou-se que essa tecnologia é composta de dois grupos distintos:

- um grupo que utiliza um processo subtrativo, geralmente fresagem, associado ao controle numérico computadorizado;
- outro grupo que utiliza um processo que adiciona material por meio da sobreposição de camadas planas, utilizando o controle numérico computadorizado associado a outras tecnologias acessórias.

Enquanto a expressão “usinagem CNC” passou a ser aceita para designar o primeiro grupo, existem controvérsias, até os dias atuais, a respeito do termo que se deve utilizar para designar o segundo grupo.

Muitas propostas foram apresentadas, tais como manufatura por camadas, fabricação de forma livre, manufatura de bancada, manufatura por acréscimo de material, manufatura aditiva (ibid.). A denominação “prototipagem rápida” (RP, da sigla em inglês) é a mais antiga, tendo sido muito utilizada e também muito criticada. Muitas vezes essa crítica baseia-se em uma falsa controvérsia, como se verá a seguir.

Em processos de projeto em design de produtos, o termo “protótipo” é utilizado para designar um tipo específico de modelo tridimensional físico que reproduz o produto em condições de operação, funcionamento e com sua aparência final.

Portanto, é possível argumentar que a palavra “prototipagem” é inadequada, porque o equipamento não obtém produtos que atendam a todas essas características. E o adjetivo “rápida” só faz sentido se for utilizado em relação a algum padrão de comparação (mais rápida que...).

Ainda que se possa observar que existe um problema de tradução (como está colocado na seção 1.4. Definição de termos-chave), e que a palavra em inglês “*prototyping*” deveria ser traduzida como “modelagem”, observa-se que, neste caso, a palavra “prototipagem” está sendo utilizada para estabelecer um padrão de comparação. Ou seja, quando se utiliza “prototipagem”, refere-se a equipamentos que têm a capacidade de obter peças cujas características de precisão, resolução, resistência mecânica, estabilidade dimensional, acabamento superficial, entre outras, permite que sejam usadas na obtenção de um protótipo de média ou alta complexidade.

Esse uso é similar ao da palavra “fotografia” quando se fala em “qualidade fotográfica” para se referir às impressões bidimensionais com qualidade equivalente ou superior à qualidade de uma fotografia.

De acordo com este raciocínio, a palavra “rápida” também se justifica, porque, antes, para obter peças com essas características seria necessário produzir pequenas séries. A prototipagem rápida tornou possível realizar uma série de um único objeto, e isso é mais rápido do que aquilo de que se dispunha antes.

Entretanto, nem todos os equipamentos de modelagem tridimensional física computadorizada que utilizam processos aditivos (que está apresentado com maiores detalhes no Apêndice 1) produzem peças com qualidade de protótipo. Existe uma grande variedade desses equipamentos, de custos mais baixos, especialmente os que utilizam processos de modelagem por fusão e deposição (FDM, da sigla em inglês), que serão caracterizados mais adiante como impressoras tipo “*desktop*”, que apresentam baixo desempenho em relação a vários aspectos nos quais equipamentos de prototipagem obtêm desempenho superior.

Por essa razão, a incoerência da expressão “prototipagem rápida” está em utilizá-la para designar todo o subconjunto que utiliza processos aditivos. Assim, é possível estabelecer a seguinte subclassificação da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada baseada em processos de adição por camadas:

Figura 24 - Peça obtida por impressora “desktop” utilizando processo FDM. Limitações técnicas comprometem a qualidade final da peça. Sem qualidade de protótipo. Fonte: foto do autor.

Figura 25 - Peça obtida por processo de jateamento de fotopolímero (Polyjet). A alta precisão do processo permite obter peças que atendem a padrões de qualidade bastante exigentes. Com qualidade de protótipo. Fonte: website do fabricante (3D Systems), acessado em agosto de 2015.

- Prototipagem Rápida (RP): equipamentos que produzem peças com características (relativas a aspectos como geometria, resistência mecânica e acabamento superficial) que permitem utilizá-las na obtenção de protótipos de média ou alta complexidade.

Para este grupo também se considerou adequada, no contexto desta pesquisa, a designação “prototipagem rápida aditiva”, ou “prototipagem aditiva”, ou simplesmente “prototipagem” quando não se fizer necessário diferenciar entre aditiva ou subtrativa.

- Impressão Tridimensional (3DP, de “*three dimensional printing*”): equipamentos que produzem peças de qualidade inferior; sem qualidade de protótipo.

Obviamente, 3DP pode ser utilizada para obter protótipos de baixa complexidade ou pouco exigentes em termos de acabamento, geometria, resistência etc. No entanto, essa distinção é útil para esclarecer a qual padrão de qualidade faz-se referência em uma situação prática.

Essas considerações também são válidas para os processos subtrativos. Existe no mercado grande variedade de fabricantes de fresadoras CNC que fornecem desde equipamentos de grande porte, destinados a aplicações mais grosseiras, como máquinas com mesa que pode receber uma chapa inteira de MDF (1.830 x 2.750 mm) e trabalha a precisão geral de operação da ordem de décimos de milímetro (0,1 mm) (AVISO, 2015), até equipamentos menores e de precisão muito maior, da ordem de 1 micrômetro (0,001 mm) (ROLAND, 2015).

Estudo realizado em 2003 na universidade de Louisville, nos EUA (GRIMM, 2003), com sete sistemas comerciais de modelagem tridimensional física computadorizada (seis por adição e um por subtração), apontou que a fresadora modelo MDX-650, fabricada pela Roland, apresentava desempenho muito superior em relação aos seguintes critérios:

- custo (de aquisição e operação);
- velocidade (tempo de máquina e tempo total);
- detalhamento;
- precisão dimensional em relação às dimensões nominais;
- acabamento superficial.

Com base nesse estudo, o fabricante (Roland) atribui ao seu equipamento a categoria de SRP (“*Subtrative Rapid Prototyping*”), que será utilizada no presente trabalho para classificar os equipamentos de modelagem tridimensional física computadorizada que utilizam processos subtrativos, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 26 - Fresadora Roland MDX 40A (que substitui o modelo MDX 650). A alta precisão permite que o processo seja considerado como prototipagem rápida subtrativa (SRP, da sigla em inglês). Fonte: website do fabricante, acessado em agosto de 2015.

Figura 27 - Classificação de tecnologias de modelagem tridimensional física computadorizada proposta pelo autor.

Em linhas gerais, observam-se as seguintes características das classes identificadas anteriormente:

- Impressão tridimensional: precisão inferior, liberdade geométrica limitada (uma vez que o material de suporte é constituído do mesmo material do modelo e tem que ser

removido mecanicamente, dificultando a obtenção de determinadas geometrias), dimensões reduzidas.

- Prototipagem rápida aditiva: alta precisão, liberdade geométrica ilimitada (uma vez que o material de suporte ou não é necessário, geralmente em processos em que a matéria-prima encontra-se inicialmente em estado de pó, ou pode ser removida quimicamente ou por alteração de fase), dimensões reduzidas.

- Usinagem CNC: precisão inferior, liberdade geométrica limitada, uma vez que a ferramenta de corte nem sempre consegue se posicionar no ângulo necessário para remover o material além da necessidade de fixação do material que será desbastado. Possibilidade de obter grandes dimensões.

- Prototipagem rápida subtrativa: alta precisão, liberdade geométrica limitada (pela mesma razão do caso anterior), dimensões reduzidas.

4.2.4. Características, potencialidades e limitações da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada

Conforme caracterizado nas seções anteriores deste subcapítulo, a tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada possibilita obter objetos reais a partir de representações virtuais geradas em computador.

Volpato (2007) observa que uma característica fundamental da “prototipagem rápida” (no caso, aditiva) é a facilidade de automação do equipamento, que é comandado diretamente por informações obtidas no modelo CAD, reduzindo significativamente a interferência do operador.

Essa característica também está presente nos procedimentos subtrativos, ainda que, neste caso, a interferência do operador seja mais significativa, especialmente para executar estratégias de usinagem em etapas. Mas a usinagem em si também é totalmente automatizada.

Observa-se que a possibilidade de automação separa o momento da definição da geometria do objeto do momento da sua confecção e define as características notáveis descritas a seguir:

a) O objeto que se obtém não está sujeito às limitações da ferramenta de que se utiliza e nem das habilidades de quem a opera.

Por exemplo: objetos obtidos em um torno têm que ser, necessariamente, um sólido de revolução; se for utilizada uma serra circular, o objeto apresentará cortes retos paralelos ou perpendiculares; se o material utilizado for argila, o objeto obtido apresentará características das ferramentas usadas (espátulas, formões etc.) e estará condicionado às habilidades de quem as utiliza.

Portanto, quando se empregam técnicas convencionais, ainda que se utilize uma oficina bem equipada e operada por profissionais habilidosos, sempre haverá limitações de ordem geométrica, ou seja, geometrias impossíveis de se obter ou que demandariam um trabalho muito extenso, a ser realizado por mão de obra muito especializada em prazos longos. Essas limitações podem ser drasticamente minimizadas, ou até mesmo eliminadas, utilizando-se adequadamente processos de modelagem tridimensional física computadorizada.

b) Outra característica decorrente da automação é a grande precisão do objeto produzido, independentemente da sua complexidade geométrica, em relação às medidas nominais (ainda que essa precisão varie consideravelmente entre os diversos processos), uma vez que as informações digitais definidas previamente são inequívocas e os equipamentos respondam a incrementos da ordem de micrômetros, em alguns casos.

Dessa característica decorre a possibilidade de realizar montagens muito precisas e que tornam possível subdividir objetos de dimensões maiores que o volume de operação do equipamento, o que viabiliza, ao menos tecnicamente, obter objetos de qualquer dimensão. A possibilidade de realizar montagens muito precisas também é útil para combinar estratégias de modelagem realizadas paralelamente por equipamentos distintos, como o caso mostrado na Figura 23 (página 62), em que foi

combinado corte a laser com usinagem CNC na confecção de um modelo de aparência.

c) A automação define, ainda, outra característica, que é a possibilidade de repetição do processo: uma vez que o equipamento está programado, é possível obter uma quantidade infinita de peças absolutamente idênticas.

d) Conforme será detalhado mais adiante, a necessidade de definir a geometria da peça previamente em computador determina a necessidade de perícia técnica e operacional para utilizar programas CAD.

No entanto, existem diferenças, em relação às vantagens e limitações, entre os processos que utilizam procedimentos por subtração ou por adição de material, conforme será observado a seguir.

4.2.4.1. Vantagens e limitações dos processos por adição de camadas

Os processos aditivos possuem algumas vantagens e algumas desvantagens em relação aos processos subtrativos, observadas a seguir:

Vantagens

a) A principal vantagem desse processo em relação aos processos de modelagem tridimensional física computadorizada baseados em procedimentos subtrativos e aos demais processos tradicionais é a completa ausência de restrições de ordem geométrica (VOLPATO, 2007; HALLGRIMSSON, 2012). É possível obter objetos de dimensões reduzidas, extremamente detalhados, com formas internas a outras formas e qualquer outra situação que se possa imaginar, sem necessidade de configurações elaboradas de máquina, de uma forma gerenciável, direta e relativamente rápida (GRENDAL, 2009).

b) Volpato (2007) cita também outras vantagens adicionais, como: não são necessários dispositivos de fixação, não se requer troca de ferramentas, pode-se produzir qualquer objeto em uma única etapa, não se requerem cálculos da trajetória da ferramenta.

c) Hallgrimsson (2012) observa que os processos aditivos são mais limpos e mais seguros que as máquinas tradicionais. Também são mais limpos e seguros que a usinagem CNC (processo subtrativo), que produz pó e aparas e utiliza ferramenta de corte rotativa exposta (fresas) que pode se romper durante o processo.

d) Grenda (2009) também observa que alguns processos por adição de camadas podem ser adequados para a fabricação simultânea de várias peças em um mesmo conjunto, dispensando montagens complexas ou mesmo viabilizando um conjunto de peças que seria impossível de obter pelos processos convencionais.

Figura 28 - Modelo de veículo blindado em escala 1:5 produzido em uma única etapa por SLS com todas as partes móveis funcionais. Fonte: website do fabricante (Shapeway), acessado em fevereiro de 2017.

e) Miniaturização: atualmente existem alguns processos aditivos com altíssima resolução que possibilitam obter objetos microscópicos que apresentam grande potencial em ampla variedade de aplicações, tais como micro-ótica e fotônica, (que é “geração, emissão, transmissão, modulação, processamento, amplificação e detecção da luz”, segundo a Wikipédia), biotecnologias como “*scaffolds*” (estruturas para alojamento de células vivas) e engenharia de tecidos, e microfluídos (controle e manipulação de líquidos em volumes muito pequenos) (NANOSCRIBE, 2017).

Figura 29 - À esquerda: maquete do Portão de Brandemburgo. À direita: microestrutura mecânica. Ambos em escala micrométrica obtidas pelo processo de polimerização por dois fótons (2PP) da Nanoscribe. Fonte: website do fabricante, acessado em fevereiro de 2017.

f) Equipamentos de desenvolvimento recente, notadamente aqueles que utilizam a tecnologia Polyjet, da Stratasys, baseados em jateamento de fotopolímeros com cura simultânea por luz ultravioleta, têm a capacidade de obter peças em mais de um material simultaneamente.

Figura 30 - Exemplo de peça obtida por equipamento da Stratasys que deposita múltiplos materiais simultaneamente. Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2013.

Como se verá mais adiante, existem equipamentos de última geração que podem depositar até seis materiais diferentes simultaneamente e diversas combinações, o que pode resultar, segundo o representante comercial da marca no Brasil, em até 1.100 combinações diferentes na mesma impressão (o que inclui materiais rígidos

e opacos, rígidos e transparentes, flexíveis e opacos, flexíveis e transparentes além dos materiais simuladores e especiais).

g) Existem alguns processos que podem obter peças totalmente coloridas (*“full color”*).

h) O desperdício de matéria-prima é muito menor do que nos processos subtrativos. Em alguns processos (como FDM) e em certos casos (por exemplo, quando não é necessário suporte), ele tende a zero. (CHUA; LEONG, 2015)

i) Existe grande variedade de equipamentos de prototipagem aditiva que são bastante amigáveis e que podem ser utilizados adequadamente em ambientes de escritório.

Limitações

Identificam-se os seguintes fatores desfavoráveis em processos baseados em adição de camadas:

a) Precisão (*“accuracy”*): Segundo Grenda (2009), existem quatro variáveis que podem interferir na precisão do processo:

- efeito escada (*“stairstepping”*), decorrente do processo de sobreposição das camadas. Pode ser mais ou menos pronunciado nos diversos processos (ibid.);

- precisão absoluta (*“absolute accuracy/precision”*), que pode ser definida como a diferença entre a dimensão final pretendida e a obtida. No processo por adição de camadas, pequenas imprecisões decorrentes de reações químicas complexas ou contrações relativas à mudança de fase por perda de calor (ou outros motivos inerentes a cada processo) são acumuladas, resultando em distorções significativas, especialmente em relação ao eixo Z (ibid.);

- acabamento (*“finishes”*): também se refere ao “efeito escada” e à precisão, mas também varia em função do processo empregado. Por exemplo: processos baseados em pó (como SLS) apresentam aparência de areia (ibid.);

- resolução (“*resolution*”): refere-se ao menor incremento que o processo pode obter. Pode ter influência sobre acabamento, “efeito escada” e precisão, mas também determina a dimensão mínima que pode ser obtida. Varia entre os diversos processos (ibid.).

b) Necessidade de estruturas de suporte. Existem processos que não necessitam de estruturas de suporte, como aqueles que utilizam matéria-prima em estado de pó, e alguns equipamentos contam com mecanismo que deposita suporte removível quimicamente ou por mudança de fase. Nos demais casos, a necessidade de estruturas de suporte é um fator limitante para determinadas geometrias.

c) Necessidade de operações secundárias: alguns processos (como FDM) podem obter peças finalizadas, mas outros necessitam de pós-processamento, que pode incluir infiltração com resinas, finalização do processo de cura em dispositivo próprio, remoção de suporte, entre outros procedimentos que podem exigir esforço considerável, custos adicionais e prazos extras (ibid.).

d) Velocidade: os processos de modelagem tridimensional por adição de camadas são consideravelmente lentos, podendo levar horas ou até mesmo dias para se obter uma peça. No entanto, para objetos muito complexos, isso pode ser mais rápido do que empregar processos subtrativos. Também é necessário computar o tempo total necessário para pré e pós-processamento, que pode variar bastante entre os diversos processos e em cada caso (ibid.).

e) Hallgrimsson (2012) também aponta a pouca variedade de materiais como limitação dos processos de prototipagem aditiva. Volpato (2007) observa que a necessidade de utilizar materiais proprietários, desenvolvidos e comercializados pelo fabricante do equipamento para determinado processo, limita a aplicação da peça que se obtém.

4.2.4.2. Vantagens e limitações dos processos por subtração

Os processos subtrativos possuem algumas vantagens e algumas desvantagens em relação aos processos aditivos, observadas a seguir.

Vantagens

a) A variedade de materiais que podem ser utilizados é muito maior que em processos aditivos, que, na sua maioria, utilizam materiais proprietários fornecidos pelo fabricante do equipamento. É possível usinar madeiras maciças e industrializadas, diversos tipos de plásticos, espumas de poliestireno e poliuretano, uma variedade de metais (VOLPATO, 2007; HALLGRIMSSON, 2012), além de um tipo de poliuretano especial para usinagem (conhecido pelo nome comercial “Cibatoool”) que oferece alta estabilidade dimensional e excelente acabamento.

b) A variedade de materiais que se pode usinar também faz com que o custo da peça final não seja necessariamente relacionado ao seu volume, como ocorre nos processos aditivos, uma vez que é possível utilizar materiais mais baratos (HALLGRIMSSON, 2012).

c) Observam-se os seguintes aspectos em relação à precisão dos processos subtrativos:

- levam vantagens sobre os processos aditivos em relação à precisão absoluta, uma vez que o posicionamento da ferramenta de corte é muito preciso e obedece rigorosamente às informações definidas no modelo matemático (GREENDA 2009);

- pode oferecer excelente acabamento (que, como foi visto, também está relacionado com a precisão) quanto se usinam materiais densos como metais, “cibatoool” ou alguns plásticos;

- no entanto, a resolução (que também se relaciona com precisão) é limitada pelo diâmetro da fresa (o menor diâmetro encontrado em pesquisa realizada no comércio foi de 0,2 mm), pelo passo do motor (que, nos modelos consultados, variou entre 0,01 a 0,001 mm) e por características da construção do equipamento, que pode resultar em uma precisão geral de operação da ordem de décimos de milímetros, nos equipamentos menos precisos (AVISO, 2017).

Nos equipamentos mais precisos (que foram classificados no 4.2.3 como SRP – “*subtractive rapid prototyping*”), a precisão geral de operação tende a ser igual à precisão do deslocamento do passo do motor (0,002 mm/passo no caso do modelo MDX-40A, da Roland).

d) Arquivos tridimensionais modelados em superfície podem ser utilizados sem exigências rigorosas em relação às conexões das diferentes curvas. O volume, no ambiente virtual, não necessita ser rigorosamente “à prova d’água”, como ocorre nos processos aditivos (HALLGRIMSSON, 2012).

e) A velocidade da usinagem CNC está diretamente relacionada com a geometria da peça. Grenda (2009, p.43, tradução do autor) observa que “não é incomum algumas peças complexas levarem, literalmente, semanas de tempo de usinagem”.

Para esses casos, a prototipagem por adição pode ser mais adequada. No entanto, existem casos menos extremos, que não apresentam dificuldades para o acesso da ferramenta de corte, nos quais a usinagem CNC pode ser mais rápida do que os processos por adição.

Limitações

a) Os processos subtrativos apresentam restrições de ordem geométrica. Segundo Volpato (2007, p.28), “o processo permite remover somente o material que pode ser alcançado pela ferramenta de usinagem”, o que inviabiliza algumas geometrias internas, e “a fixação de peças com paredes delgadas não é uma tarefa muito simples”.

Tais restrições podem ser minimizadas utilizando-se de equipamentos com quatro ou cinco eixos. Também é possível reduzir restrições geométricas planejando a usinagem em etapas (HALLGRIMSSON, 2012).

b) Observou-se que, em ambientes em que se opera fresadora CNC, o fator segurança é crítico. As fresadoras trabalham com a ferramenta de corte exposta

e submetida a tensões que podem levar ao seu rompimento durante a operação, o que gera risco de acidente envolvendo o operador.

Por esta razão, o equipamento deve ser operado apenas por pessoal treinado, utilizando equipamento de proteção individual (protetor facial é mais adequado que óculos de proteção).

c) Observou-se também que, devido às suas características operacionais como segurança, geração de pó e aparas (ibid.) e nível de ruído, em muitos casos, pode ser necessário encapsular o equipamento, especialmente os de maior porte.

d) Em função de suas características operacionais, os equipamentos de maior porte são mais adequados ao ambiente de oficina. Existem equipamentos de menor porte, como a linha de fresadoras da Roland, que podem ser adequadamente utilizados em ambiente de escritório.

e) Experimentos realizados em uma fresadora CNC demonstraram que a fragilidade e o custo relativamente alto das ferramentas de corte (fresas) também constituem uma limitação, pois um erro no planejamento do processo acarreta, invariavelmente, a quebra da fresa.

f) Usinagem CNC também exige conhecimento sobre programas CAM (*Computer Aided Manufacturing*), que podem variar de muito simples até muito complexos (ibid.), e também algum conhecimento prévio, ao menos de nível básico, sobre práticas de usinagem (GREND, 2009).

4.2.5. Necessidade de competência técnico-operacional para utilizar programas CAD

Além das limitações específicas dos processos por subtração e por adição discutidas anteriormente, existe outra limitação, de caráter geral, que se faz presente quando se cogita utilizar a tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada. Para que seja possível utilizar a referida tecnologia, o primeiro passo é obter um modelo digital tridimensional.

Volpato (2007) aponta que há três maneiras de obter esse modelo:

- pela digitalização de um volume por meio de scanners tridimensionais;
- por ressonância magnética ou da tomografia computadorizada, equipamentos utilizados em medicina;
- pela utilização direta de modeladores geométricos conhecidos por programas CAD.

Os dois primeiros casos não serão discutidos aqui por envolverem tecnologias e equipamentos que não são objetos deste estudo. No caso dos programas CAD, existem algumas peculiaridades, explicitadas a seguir.

Hallgrimsson (2012) observa que o desenvolvimento da tecnologia de prototipagem está diretamente relacionado ao desenvolvimento da modelagem sólida em computador, o que determina a necessidade de acesso a programas CAD e habilidade na sua utilização, como está destacado no trecho a seguir:

É necessário ter acesso a programas CAD 3D e a habilidade necessária, portanto, deslocou-se de ser possível construir a peça fisicamente para ser possível manipular a geometria 3D no computador. Este fato é frequentemente esquecido, e a eficácia do processo pode ser que gravemente afetada se o projetista não tem bom domínio de CAD 3D. (ibid., p.65, tradução do autor)

Em primeiro lugar, observa-se que a utilização de tecnologia computacional como meio para obter modelos tridimensionais físicos de projetos de produtos em desenvolvimento é essencialmente diferente da forma como ela é utilizada para obter representações bidimensionais. Mesmo que, nesse caso, utilizem-se modelos virtuais que simulem tridimensionalidade, o produto final ainda é uma imagem, e a exigência de coerência geométrica não é tão rigorosa.

Para programar equipamentos de controle digital são necessários modelos que devem ser interpretados como objetos únicos e consistentes, e isso pode ser obtido de duas maneiras: utilizando-se softwares de modelagem sólida paramétrica como o Solid Works ou Autodesk Inventor, ou softwares que são primariamente baseados em superfícies, o que exige conhecimento sobre como criar uma malha juntando todas as diferentes superfícies para descrever um sólido “à prova d’água” (ibid.).

Volpato (2004, p.103-104) também observa, no trecho a seguir, a necessidade de conhecimento específico para trabalhar com superfícies:

As superfícies que dão forma ao modelo devem conter interseções bem definidas, evitando-se quebras ou falhas nas conexões e superposições de superfícies. [...] uma peça modelada em superfícies deve ser totalmente fechada, formando o volume exato do material que comporá a peça final.

Além desse aspecto de caráter técnico, deve-se considerar também que o processo contínuo de evolução da tecnologia computacional levou ao surgimento de programas CAD que permitem representar objetos com qualquer forma geométrica.

No entanto, para alcançar tal capacidade, os programas tornaram-se altamente complexos, disponibilizando grande quantidade de ferramentas digitais, cada qual com uma variedade de parâmetros que precisam ser configurados adequadamente. Um usuário de nível médio raramente usa mais do que uma pequena parcela dos recursos disponíveis.

Portanto, o domínio aprofundado de programas CAD, que permita ao usuário expressar-se com liberdade, exige um nível de perícia similar ao de um atleta de alto desempenho ou de um musicista virtuoso.

Segundo Sternberg (2010, p.412), “perícia significa habilidades ou realizações superiores que refletem uma base de conhecimento bem desenvolvida e bem organizada”. O autor apresenta um quadro-resumo de quatorze características que diferenciam peritos de iniciantes, dentre as quais se destacam os aspectos relacionados a seguir.

- Possuir esquemas amplos e grande quantidade de conhecimentos sobre o campo, em contraste com os principiantes, que possuem esquemas limitados e quantidade menor de conhecimentos.
- Possuir unidades de conhecimento bem organizadas e interconectadas, em contraste com os principiantes, que possuem unidades mal organizadas e pouco conectadas.

- Usar “análise de meios-fins” somente como estratégia de apoio para lidar com problemas incomuns ou atípicos, em contraste com os principiantes, que usam frequentemente a “análise de meios-fins” para lidar com a maior parte dos problemas.
- Seus esquemas contêm grande quantidade de conhecimento sobre estratégias de problemas relevantes para o campo, em contraste com os principiantes, cujos esquemas possuem pouco conhecimento.
- Possuir muitas sequências automatizadas de passos, em contraste com os principiantes, que apresentam pouco ou nenhuma automatização.
- Demonstrar grande eficiência na resolução de problemas (no caso, de construção de geometrias complexas) e maior rapidez quando há limitação de tempo, em contraste com os principiantes, que são relativamente ineficientes e mais lentos.
- Prever de modo preciso a dificuldade para solucionar determinados problemas, em contraste com os principiantes, que não preveem de modo preciso tal dificuldade.
- Monitorar cuidadosamente os próprios processos e estratégias, em contraste com os principiantes, que realizam pouco monitoramento.
- Demonstrar grande precisão para alcançar soluções apropriadas, em contraste com os principiantes, que demonstram precisão muito menor.
- Diante de informação nova que contradiz as informações iniciais, demonstram flexibilidade para adaptar-se a uma estratégia mais apropriada, em contraste com os principiantes, que demonstram pouca flexibilidade.

O mesmo autor aponta, citando estudos de K. Anders Ericsson, que a prática em determinada especialidade tem papel fundamental para adquirir perícia, conforme se observa no trecho a seguir:

As pessoas que, no futuro, serão peritas diferem de seus pares principalmente por sua participação em atividades práticas especiais que

as auxiliam a suplantar seu atual desempenho por meio de repetições e refinamento gradual [...] nos domínios da música, dos esportes e do xadrez, as pessoas com melhor desempenho começaram cedo e dedicaram até quatro horas diariamente durante muitos anos de prática deliberada, o que resulta em muitos milhares de horas [...]. (ibid., p. 412)

No caso específico abordado – perícia em utilizar programas CAD para representar formas de geometria complexa com precisão e demais características necessárias à programação de equipamentos de modelagem tridimensional física computadorizada –, observa-se que apenas profissionais que usam diariamente determinado programa durante anos tornam-se capazes de se expressar (ou seja, criar formas geométricas complexas) com liberdade.

Esse alto nível de especialização exige, muitas vezes, a separação da atividade de modelagem digital daquela de criação propriamente dita.

Na indústria automobilística, por exemplo, a utilização da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada tem se mostrado intensa: fresas tridimensionais comandadas por controle numérico computadorizado (CNC) transpõem estudos realizados em computador para um objeto físico em escala natural, seguidos por avaliações e alterações feitas à mão (FIAT MIO, 2010). Outros equipamentos também são usados para obter representações de componentes, como lanternas, câmbio, volante etc. (ROBTEC, 2013), durante a fase de desenvolvimento do projeto.

Nesse caso, o problema colocado pela necessidade de perícia técnica e operacional para obter o modelo CAD 3D é resolvido por meio da separação da atividade de criação, a cargo do designer, da atividade de modelagem virtual, a cargo de outro profissional especializado (Pensando o design automotivo, 2011).

No entanto, no contexto do ensino, tal separação não parece viável, pois é importante que o estudante de design tenha contato com todas as fases do processo de desenvolvimento do projeto e, dessa forma, compreenda todas as dificuldades envolvidas.

Por outro lado, também não é possível esperar que alunos nos primeiros anos da sua formação apresentem a perícia que só será atingida após anos de prática profissional. Então, pergunta-se: de que forma essa tecnologia pode ser utilizada no contexto acadêmico?

Essa questão precisa ser devidamente equacionada para que a tecnologia em estudo possa, de fato, ser integrada ao contexto do ensino em escolas de design.

4.2.6. Panorama atual e disponibilidade de tecnologias e equipamentos de modelagem tridimensional física computadorizada atualmente no Brasil

4.2.6.1. Processos aditivos

No Apêndice 1 estão relacionados os principais processos de modelagem tridimensional por adição de camadas, classificados segundo a norma ISO/ASTM 52900 de 2015, assim como explicações sobre os seus aspectos técnicos e operacionais.

Serão apontadas a seguir características do panorama atual, enfatizando os processos e equipamentos mais disponíveis, principais fornecedores, aplicações típicas, assim como alguns aspectos do mercado brasileiro.

A partir de extensa coleta de informações, que incluiu presença em conferências e exposições, visitas a fornecedores, escolas e institutos de pesquisa, entrevistas com usuários e pesquisadores, foi possível observar em detalhes algumas características desse panorama.

Destaca-se que as tecnologias de modelagem tridimensional física computadorizada baseada em processos aditivos, atualmente, estão distribuídas nos seguintes grupos e subgrupos, que serão discutidos a seguir:

- impressoras tridimensionais “*desktop*”;
- equipamentos para prototipagem e produção;
- impressoras em metal.

4.2.6.1.1. Impressoras tridimensionais “desktop”

Esses equipamentos utilizam, na sua maioria, o processo de modelagem por fusão e deposição (FDM), e recentemente também tem se observado a disseminação de equipamentos que utilizam o processo de estereolitografia (SLA). Serão apontadas, a seguir, as características de equipamentos “desktop” que utilizam esses processos.

Impressoras FDM “desktop”

Este grupo de equipamentos é adequado para obter peças que serão submetidas a condições de utilização pouco exigentes, notadamente em relação à precisão, resolução, resistência mecânica e acabamento superficial.

Os equipamentos FDM “desktop” utilizam como matéria-prima filamentos de diversos termoplásticos fornecidos em bobinas ou em cartucho com codificação eletrônica, especialmente PLA (ácido polilático), um polímero biodegradável de origem vegetal e de baixo ponto de fusão, e ABS (“*Acrylonitrile Butadiene Styrene*”), polímero derivado de petróleo muito utilizado em diversas aplicações industriais.

Figura 31 - Peça obtida em impressora tipo “desktop” utilizando filamento de PLA. Observa-se que o “efeito escada” é bastante pronunciado. Fonte: peça produzida e foto por Sergio Sbezz.

Peças impressas em PLA apresentam baixa resistência mecânica (fraca adesão entre camadas) e efeito escada bastante pronunciado. É possível obter qualidade superior usando ABS, mas as condições técnicas, neste tipo de impressora, não são ideais para esse fim.

Observa-se que o grupo de impressoras “*desktop*” que utilizam FDM é composto de três subgrupos, que serão descritos a seguir.

O primeiro subgrupo pode ser denominado de impressoras “feitas em casa”. São equipamentos construídos por entusiastas utilizando componentes comprados avulsos pela internet e utilizados como atividades de lazer ou em produções domésticas de peças e produtos de baixa complexidade que raramente são comercializados.

Figura 32 - Impressora tipo “faça você mesmo”.

Fonte: <http://faz-voce-mesmo.blogspot.com.br>, acessado em dezembro de 2016.

O segundo subgrupo de impressoras “*desktop*” que utilizam o processo FDM é constituído de equipamentos fornecidos por fabricantes nacionais ou de outros

países e utilizam filamentos de termoplásticos genéricos que podem ser comprados em bobinas. Existe grande variedade de equipamentos desse tipo destinados a diversos seguimentos de mercado, e de diversos valores.

Foi apurado junto aos usuários de diversos modelos desses equipamentos que a principal diferença entre eles diz respeito a sua robustez, possibilidade de permanecer em operação contínua por horas, ou mesmo dias, e possibilidade de se manter em boas condições de operação ao longo do tempo.

Entre outras características diferenciais que se observa nesse tipo de impressora, destacam-se os itens relacionado a seguir.

- Mesa aquecida, que é necessária para facilitar o processo de fixação da peça a ser impressa e também para manter a temperatura durante a impressão e, assim, evitar retração, que pode acarretar o descolamento das camadas. É especialmente necessário quando se utiliza filamento de ABS.
- Gabinete fechado, que também colabora para manter a temperatura da peça e também diminui a quantidade de energia necessária para fundir o filamento. Também facilita a impressão em ABS.
- Mesa com nivelamento automático que dispensa ajustes finos manuais.
- Possibilidade de utilizar dois cabeçotes para aplicar duas cores na mesma peça ou para aplicar um material distinto de fácil remoção que pode ser utilizado como material de suporte. É pouco usual nesse tipo de impressora.
- Alguns produtos incluem outras facilidades, como câmera de vídeo para acompanhamento remoto da impressão através da internet.

Na Tabela 2 e na Figura 33 estão apresentados quatro exemplos de impressoras FDM “*desktop*” apontados por usuários, em blogs especializados, na internet, como equipamentos de boa qualidade disponíveis no Brasil.

Figura 33 - Exemplos de impressoras tipo “desktop” que utilizam processo FDM, apontadas por usuários como equipamentos de boa qualidade disponível no Brasil. Acima à esquerda: Stella 3D; acima à direita: Voolt 3D; abaixo à esquerda: GT Max 3D; abaixo à direita Ultimaker 2.
Fonte: websites dos fabricantes, acessados em janeiro de 2017.

Impressora	3D Stella	Voolt 3D	GTMax 3D	Ultimaker 2
País de origem	Brasil	Brasil	Brasil	Holanda
Vol. de impressão	20 x 20 x 20 cm	20 x 20 x 18 cm	30 x 20 x 25 cm	30 x 20 x 25 cm
Altura da camada	0,05 mm	0,05 e 0,25 mm	0,05 e 0,32 mm	0,02 e 0,6 mm
Diâmetro de saída do material fundido	0,4 mm	0,3 mm	0,4 mm	0,4 mm
Matéria-prima utilizada	PLA, PET, náilon, PC	PLA, PETG, PC	PLA, ABS, PETG, PC	PLA, ABS, CPE, PC, náilon, TPU
Preço (em 2016)	R\$ 2.000,00	R\$ 2.800,00	R\$ 5.200,00	R\$ 18.000,00
Outras características	<ul style="list-style-type: none"> - sem mesa aquecida - sem nivelam. automático - sem gabinete fechado 	<ul style="list-style-type: none"> - com mesa aquecida - com nivelam. automático - sem gabinete fechado 	<ul style="list-style-type: none"> - com mesa aquecida - com nivelam. automático - com gabinete fechado 	<ul style="list-style-type: none"> - com mesa aquecida - com nivelam. automático - com gabinete fechado

Tabela 2 - Principais características de algumas impressoras tipo “desktop” que utilizam o processo FDM apontadas por usuários como equipamentos de boa qualidade disponível no Brasil.

Fonte: websites dos fabricantes acessado em janeiro de 2017.

O terceiro grupo de impressoras “desktop” que utilizam o processo FDM refere-se àquelas que utilizam filamentos fornecidos em cartuchos lacrados e com codificação eletrônica (chamados de “cartuchos chipados”).

Figura 34 - Impressora CubePro Duo da 3D Systems que utiliza cartucho “chipado”.

Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

Como exemplo de impressora deste grupo é possível citar a linha CubePro, comercializada pela 3D Systems que possui três modelos com um, dois ou três bicos de extrusão. O modelo com três bicos de extrusão pode trabalhar com até três materiais diferentes, ABS, PLA e náilon, e três cores diferentes simultaneamente.

O PLA pode ser dissolvido em solução de hidróxido de sódio aquecida e, portanto, pode ser usado como material de suporte solúvel neste tipo de impressora, mas esta opção necessita de cuidados para obter êxito, conforme foi verificado junto ao fabricante.

O modelo com maior envelope de impressão da linha CubePro tem dimensões de 200 x 230 x 270 mm e deposita camadas com a espessura de 0,07, 0,2 ou 0,30 mm.

O cartucho de filamento lacrado e fornecido pelo fabricante garante a conservação do material, além do diâmetro exato, o que garante que ele fundirá em temperatura precisa (HALLGRIMSSOM, 2012), mas interfere diretamente no custo de operação, além de proporcionar inseguranças em relação à continuidade do fornecimento.

Segundo opiniões obtidas de usuários, impressoras com esta característica não obtêm peças com qualidade significativamente superior em relação às obtidas por impressoras que utilizam filamentos genéricos fornecidos em bobinas.

Impressoras SLA “desktop”

Recentemente o processo de estereolitografia (SLA) também passou a ser utilizado em equipamentos com características de “desktop”.

SLA é o processo mais antigo de modelagem tridimensional física computadorizada baseado em adição de material e foi patenteado em 1986 por Chuck Hull, que também foi o fundador da empresa 3D Systems.

A proximidade da queda da patente, que veio a ocorrer em 2014, levou a novas pesquisas utilizando o princípio da solidificação de resina fotossensível por luz

ultravioleta ou laser, o que acarretou o surgimento de nova geração de equipamentos SLA “*desktop*”, com custos de aquisição e operação inferiores aos do processo original, que têm despertado interesse como alternativa às impressoras FDM “*desktop*”, que apresentam muitas deficiências.

Figura 35 - Peça obtida em impressora “*desktop*” Formlabs Fom 1, que utiliza o processo SLA.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

Segundo informações obtidas com usuários de impressoras SLA “*desktop*”, as peças obtidas em resina acrílica apresentam excelente acabamento superficial (efeito escada quase imperceptível) e alta resolução (que é a capacidade de obter pequenos detalhes).

Por meio de um sistema de financiamento coletivo, duas novas empresas, a B9 Creator e a Formlabs, obtiveram tanto sucesso explorando uma configuração inovadora, que determinaram novos padrões, que vêm sendo imitados por outros fabricantes de equipamentos subsequentes.

A fonte de luz em impressoras SLA pode ser posicionada de duas formas distintas, que serão descritas a seguir.

- No formato denominado “*top down*”, utilizado originalmente, a luz é fornecida de cima para baixo, e a plataforma de impressão desloca-se no eixo z para baixo, dentro da cuba preenchida de resina.

- No formato denominado *“botton up”*, a luz é fornecida de baixo para cima através de uma cuba transparente e uma plataforma ascendente, onde se fixa a primeira camada e que puxa a peça para cima enquanto ela é construída.

As impressoras da Formlabs e B9 Creator utilizam a configuração *“botton up”*, o que acarreta, como principal benefício, a necessidade de volume de resina muito inferior em relação ao que é necessário na configuração *“top down”*, para dar início ao processo, o que reduz drasticamente o custo de operação.

Mas essa configuração também leva a um dos principais problemas: a degradação da cuba, que é descartável, uma vez que seu fundo vai perdendo a transparência. Em razão desta característica, o fabricante recomenda sua troca a cada dois litros de resina, e uma cuba padrão da Formlabs custa em torno de 60 dólares (em dezembro de 2016), sem contar impostos e fretes.

Figura 36 - Impressora SLA *“botton up”* Fom 2 da Formlabs.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

Figura 37 - Impressora DLP da B9 Creator, que utiliza um projetor para expor uma camada inteira de cada vez, o que torna o processo mais rápido.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

A Formlabs utiliza laser que descreve uma trajetória em cada camada do processo de fabricação, como no processo SLA original.

A B9 Creator utiliza como fonte de luz um princípio denominado “processamento digital de luz” (DLP, da sigla em inglês). Esse processo, SLA por DLP, normalmente denominado apenas DLP, utiliza um projetor de alta resolução para expor cada camada de uma só vez, o que torna o processo bem mais rápido.

Observaram-se referências a aspectos negativos das impressoras SLA “desktop”, descritos a seguir.

- O processo SLA utiliza uma resina medianamente tóxica e que é muito viscosa, grudenta e difícil de limpar. É necessário usar luvas e outras formas de proteção

e dispor de muitos litros de álcool isopropílico para limpeza, além de panos de microfibra, toalha de papel, além de outros insumos.

- O operador do equipamento tem que lidar com luz intensa, que pode causar danos aos olhos.

- As impressoras SLA e DLP necessitam de manutenção constante. Algumas soluções caseiras podem ser utilizadas, como limpar a lente e o espelho com um kit de limpeza para câmeras fotográficas.

Em relação às estruturas secundárias (análogas aos suportes utilizados nos demais processos), nas SLAs “*botton up*” as camadas são adicionadas por baixo da peça que vai se formando, então a estrutura puxa, ao invés de apoiar. E como nas SLAs, a adesão entre camadas é razoavelmente forte e as camadas são razoavelmente contínuas, e é possível ter estruturas secundárias bem finas, o que ajuda a economizar material.

Figura 38 - À esquerda a impressora Carbon 3D, e à direita uma peça em processo de impressão.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

Outro aspecto que se observa em relação a camadas é o mecanismo de separação. Depois de cada camada curada existe uma tendência de ela aderir no fundo da

cuba, portanto, é necessário fazer um pequeno movimento para destacar do fundo e movimentar a resina de modo que ela se acomode embaixo da peça. A Formlabs resolve este problema com um movimento de inclinação da cuba, enquanto a B9 Creator realiza um movimento lateral.

A Carbon 3D (Figura 38) é uma impressora SLA com uma tecnologia inovadora que utiliza o oxigênio para evitar que a última camada impressa se fixe no fundo da cuba tornando o processo praticamente contínuo, portanto, muito mais rápido e praticamente eliminando o “efeito escada”.

Após a impressão, a peça deve ficar imersa em álcool isopropílico, para limpar, e depois é levada para pós-cura ao sol ou em uma câmara de luz ultravioleta, que algumas marcas fornecem como item opcional. Também se deve observar que pós-cura em excesso pode causar rachaduras, degeneração das superfícies e problemas com a pigmentação.

E, por fim, existe o acabamento da peça. Depois de remover os suportes, é possível dar acabamento com lixa, caso necessário, porque, embora as linhas horizontais (efeito escada) sejam quase invisíveis, em alguns casos elas aparecem.

Figura 39 - Peça obtida em impressora Formlabs Fom 1.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

Tem surgido uma variedade de materiais para ser utilizado com o processo SLA, o que colabora para torná-lo mais atrativo. Já estão disponíveis materiais flexíveis, materiais para moldes que derretem facilmente, materiais extrarrígidos, materiais de alta resolução e até resinas personalizadas.

Da comparação entre as impressoras FDMs e SLAs “*desktop*” destacam-se os seguintes aspectos descritos a seguir.

- Impressoras FDM utilizam altura de camada entre 0,1 e 0,3 mm, e as SLA utilizam altura de camada entre 0,025 e 0,1 mm.
- Geralmente o custo de operação das SLAs é de quatro a oito vezes maior que o de uma FDM, segundo informações encontradas em blogs na internet.
- As peças produzidas por SLA podem ser transparentes, dependendo da resina que se utiliza, e são mais lisas do que as produzidas por FDM.
- As impressoras SLA têm volume de impressão de três a quatro vezes menor do que as impressoras FDM.
- O processo SLA por DLP tende a ser mais rápido do que SLA por varredura de feixe de laser, uma vez que cada camada é exposta de uma só vez. A comparação entre SLAs e FDMs no que diz respeito à velocidade para se obter uma peça dependerá de algumas variáveis, tais como a geometria da peça, a necessidade de estruturas de suporte ou sustentação, a espessura da camada e tempo de pós-acabamento, mas, em termos gerais, é possível afirmar que ambos os processos são bastante lentos.
- Com SLA é possível obter detalhes de dimensões inferiores aos que se obtêm por FDM.
- As SLAs tendem a desperdiçar maiores quantidades de material, uma vez que as sobras da resina fotossensível não podem ser reaproveitadas indefinidamente.

- As peças obtidas por resina fotossensível tendem a deformar com o passar do tempo, especialmente se forem submetidas a condições desfavoráveis, tais como excesso de luz e calor. A deformação também tende a ser mais acentuada em determinadas geometrias.

4.2.6.1.2. Equipamentos para prototipagem e produção

Este grupo é composto de impressoras de maior complexidade tecnológica e que, portanto, realizam os processos com controle mais rigoroso e podem obter componentes que atendem a condições de utilização mais exigentes do que as peças obtidas por impressoras “desktop”.

Os processos utilizados neste grupo de equipamentos são os seguintes: modelagem por fusão e deposição (FDM), estereolitografia (SLA), jateamento de fotopolímero (Polyjet e MJM), jateamento de aglutinante sobre leito de pó (CJP, que anteriormente era chamado de 3DP quando comercializado pela ZCorp) e sinterização seletiva a laser (SLS). No Apêndice 1 encontram-se explicações detalhadas sobre cada um desses processos.

No Brasil, assim como nos Estados Unidos, o mercado de equipamentos desta categoria é dominado por duas grandes empresas americanas, que passaram a deter suas patentes após um longo processo de fusões e aquisições ocorrido entre o fim do século XX e o início do século XXI. Essas empresas são a Stratasys e a 3D System, que serão abordadas mais detalhadamente a seguir.

4.2.6.1.2.1. Stratasys

De acordo com a Wikipédia, a Stratasys foi fundada em 1989 por S. Scott Crump, que inventou e patenteou o processo de modelagem por fusão e deposição (FDM). Em 1995, adquiriu da IBM a propriedade intelectual sobre o projeto de uma pequena impressora que utilizava um processo bastante similar ao processo FDM inventado por Crump e empregou dezesseis de seus engenheiros.

Em 2003, o processo FDM da Stratasys era o mais vendido no mundo entre os processos disponíveis de modelagem tridimensional por adição de camadas, e em 2007, a Stratasys era fornecedora de 44% dos equipamentos existentes mundialmente, tornando-se líder de mercado pelo sexto ano consecutivo.

Em 2011, adquiriu a Solidscape, que detinha a tecnologia de impressão de alta precisão com cera direcionada a aplicações de moldes com cera perdida, especialmente no setor de joalheria.

Em 2013, fundiu-se com a empresa israelense Objet e passou a deter a tecnologia de jateamento de fotopolímero. Naquele ano, adquiriu também a MakerBot.

Atualmente possui sede em Eden Prairie, Minnesota, Estados Unidos, tem ações negociadas na bolsa americana NASDAQ, reportou receita da ordem de 700 milhões de dólares em 2015, ano em que empregou 2.800 funcionários, de acordo com a Wikipédia, e atua nas áreas de fabricação e comercialização de equipamentos de modelagem tridimensional física computadorizada, fornecimento de peças obtidas por seus equipamentos e desenvolvimento e comercialização de softwares.

Todos os equipamentos fabricados e comercializados pela marca Stratasys, atualmente, baseiam-se nos processos FDM ou jateamento de fotopolímero. A marca Solid Scape, que pertence ao grupo, utiliza o processo de jateamento de cera fundida (*“Thermojet”*).

Em relação ao processo FDM, a marca Stratasys comercializa quatro famílias de equipamentos: Mojo, uPrint, Dimension e Fortus, além da marca MakerBot.

Os equipamentos da MakerBot apresentam as características de impressoras *“desktop”* que utilizam processo FDM e filamentos fornecidos em bobinas, similares às que já foram mencionadas anteriormente neste subcapítulo.

A seguir serão apresentadas as demais famílias de produtos, apontando suas características gerais.

Mojo

Figura 40 - Impressora tridimensional Mojo, da Stratasys. À esquerda: materiais de consumo. À direita: equipamento utilizado para retirar material de suporte, solúvel em solução aquosa. Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

É uma linha de equipamentos que possui proporções de equipamentos tipo “desktop” (tal como foi caracterizado anteriormente), mas que apresenta cabeçote de impressão com dois bicos de extrusão, um para material de modelo e outro para material de suporte (característica que não se observa nas impressoras tipo “desktop”), e o material de suporte é solúvel em solução aquosa.

Utiliza material proprietário fornecido em bobinas lacradas, o que, como já foi observado, garante a conservação do material e outras características técnicas, mas, ao mesmo tempo, apresenta um custo de operação superior ao de outros fabricantes que utilizam filamentos genéricos fornecidos em bobinas.

Possui o menor volume de impressão de toda a linha de equipamentos Stratasys (127 x 127 x 127 mm), deposita camadas com espessura de 0,178 mm, o que é a menor espessura de toda a linha de equipamentos Stratasys que utiliza o processo FDM (existem outros equipamentos que também depositam camadas com essa espessura), mas não deposita camadas com espessura superiores, o que não permite controlar a relação entre a qualidade da peça e a velocidade de impressão.

uPrint e Dimension

Figura 41 - Impressora tridimensional uPrint SE, da Stratasys.
 À esquerda: materiais de consumo e equipamento utilizado para remover material de suporte.
 Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

Figura 42 - Linha de impressoras tridimensionais Dimension, da Stratasys.
 Esquerda: Dimension 1200es. Direita: Dimension Elite.
 Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

As linhas uPrint e Dimension são de uma categoria intermediária entre as linhas Makerbot e Mojo e a linha Fortus, que, segundo a empresa, é destinada à produção. As impressoras uPrint ainda possuem dimensões relativamente pequenas (próximas às de uma impressora “desktop”) e trabalham com duas espessuras de camada,

0,254 mm e 0,330 mm, o que proporciona duas velocidades de impressão. Seu volume de impressão é de 203 x 203 x 152 mm,

As impressoras da linha Dimension são as mais vendidas mundialmente pela Stratasys. Possuem dois modelos, sendo que o de maior porte (Dimension 1200es) trabalha com duas espessuras de camada, 0,254 e 0,330 mm, e possui volume de impressão de 254 x 254 x 305 mm, e a Dimension Elite deposita camadas com espessuras de 0,178 e 0,254 mm e possui volume de impressão de 203 x 203 x 305 mm.

As duas linhas de produtos utilizam como matéria-prima o mesmo tipo de termoplástico utilizado pela Mojo (ABS plus), apresentam cabeçote de impressão com dois bicos de extrusão (um para material de modelo e outro para suporte) e o material de suporte destacável ou solúvel em solução aquosa mediante a utilização de equipamento secundário fornecido pelo fabricante.

Fortus

Figura 43 - Linha de impressoras tridimensionais Fortus, da Stratasys.
Da esquerda para a direita: Fortus 380mc, Fortus 450mc e Fortus 900mc.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

A linha de impressoras Fortus é composta de equipamentos de grande porte, de alta complexidade tecnológica e que são denominados pela empresa como equipamentos de produção. Podem obter grandes peças estruturais, assim como fabricar em pequena escala (HALLGRIMSSON, 2012).

Alguns equipamentos dessa linha trabalham com quatro espessuras diferentes de camadas (0,128, 0,178, 0,254 e 0,330 mm), e o maior deles (Fortus 900mc) possui volume de impressão de 914 x 610 x 914 mm.

Todos os equipamentos dessa linha (assim como todos os equipamentos da marca Stratasys que utilizam o processo FDM) possuem cabeçote de impressão com dois bicos de extrusão, um para material de suporte e outro para material de modelo, mas, neste caso, podem utilizar diferentes tipos de material de suporte (solúveis ou destacáveis).

O modelo mais sofisticado (Fortus 900mc) pode utilizar até doze termoplásticos diferentes (não simultaneamente), como diversos tipos de ABS (acrilonitrila butadieno estireno), ASA (acrilonitrila estireno acrilato), náilon, diversos tipos de policarbonatos, PPSF/PPSU (polifenilsulfona) e dois tipos diferentes de Ultem, que é uma polieterimida, ou seja, um tipo de termoplástico de alto desempenho que possui certificação FST (sigla em inglês para flamabilidade, fumaça e toxicidade) e, devido às suas características excepcionais, é indicado para aplicações aeroespaciais, automotivas e também médicas e militares.

Os equipamentos Mojo, uPrint, Dimension e Fortus possuem qualidade técnica superior às impressoras “desktop” e, portanto, realizam o processo de fusão e deposição com maior controle. Por essa razão, são mais adequados para a utilização de filamento de ABS e outros plásticos industriais como matéria-prima, com os quais é possível obter peças bastante robustas. As peças obtidas apresentam efeito escada pronunciado, uma vez que a espessura de camada, nos quatro casos, é da ordem de décimos de milímetros. As peças aceitam pós-acabamento com massa e lixa (CHUA; LEONG, 2015).

Objet

A linha de impressoras Objet utiliza o processo de jateamento de fotopolímero (que está detalhado no Apêndice 1), denominado “Polyjet”, desenvolvido e patenteado pela empresa israelense Objet Geometries Ltda. no início dos anos 2000, que foi adquirida pela Stratasys em 2012.

Figura 44 - Impressora “multi-material” Objet 260 Connex 3, da Stratasys.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

Esse processo deposita a menor espessura de camada entre os processos de modelagem tridimensional física computadorizada baseados em procedimentos aditivos, que varia entre 16, 28 e 36 micrômetros (1 micrômetro = 0,001 mm).

Utiliza material de consumo (resina fotossensível) fornecido exclusivamente pelo fabricante do equipamento em uma variedade que inclui materiais opacos e rígidos (coloridos), transparentes, flexíveis, que simulam polipropileno, que simulam ABS, para aplicações em altas temperaturas e material biocompatível.

A linha Objet Connex oferece a possibilidade de depositar alguns desses materiais simultaneamente, sendo a única tecnologia aditiva “multi-material” disponível e que também oferece a possibilidade de obter produtos totalmente coloridos (“full color”).

Segundo o representante comercial da marca no Brasil, o modelo Objet 260 Connex 3, que possui três compartimentos duplos para material de modelo e um compartimento duplo para material de suporte, deposita até seis materiais diferentes simultaneamente e diversas combinações, o que pode resultar em até 1.100 combinações diferentes na mesma impressão, o que inclui materiais rígidos e opacos, rígidos e transparentes, flexíveis e opacos, flexíveis e transparentes, além dos materiais simuladores e especiais, como para altas temperaturas ou para fundição.

Com esse equipamento é possível obter diversas peças simultaneamente, cada uma em um material diferente, ou peças com dois ou mais materiais básicos diferentes, ou ainda peças com todas as combinações possíveis dos materiais básicos.

O fotopolímero utilizado é sempre uma resina de base acrílica, no entanto, é possível obter materiais que simulam as propriedades de outros materiais, como ABS. Ou seja, o material obtido, denominado ABS digital, não é, de fato, ABS, mas, após a cura, apresenta propriedades mecânicas e térmicas similares. O custo desses materiais simulados é superior ao dos materiais fornecidos na forma de filamentos em bobinas para impressoras FDM.

Entre os seis materiais utilizados simultaneamente, é possível utilizar um na cor magenta, outro na cor amarelo e outro na cor ciano, outro preto e outro branco, além de um sexto material. Como mencionado, é possível depositar qualquer combinação possível dessas cores, e, portanto, é possível obter peças totalmente coloridas e com transições contínuas (*“dégradés”*).

Em decorrência da espessura da camada, que está entre as mais finas, esta linha de equipamentos obtém peças com excelente acabamento superficial, razão pela qual é muito procurada. Só é superada pelos equipamentos da Solidscape, que utilizam o processo Thermojet (que está descrito no Apêndice 1).

Equipamentos que utilizam a tecnologia Polyjet também apresentam excelente produtividade em razão de uma particularidade do processo: o movimento horizontal não ocorre pela combinação de dois movimentos, um na direção X e outro na direção Y, como acontece em outros casos (por exemplo, no processo FDM). Uma haste contendo centenas de bicos de jateamento alinhados desloca-se em uma direção e estas são acionadas individualmente em posições definidas pelo modelo matemático.

Desta forma, obter diversas peças simultaneamente ocupando totalmente o envelope de construção leva pouco tempo a mais do que obter uma única peça pequena.

De acordo com depoimento de um operador desse equipamento, se para obter uma peça no processo Polyjet leva-se uma hora, então para a obtenção de duas peças levará uma hora e dez minutos, enquanto no processo FDM, se uma peça leva uma hora, duas peças levarão duas horas.

Figura 45 - Modelo obtido pela impressora “multi-material” colorida Objet 260 Connex 3, da Stratasys. Neste caso, a sola é feita de material flexível.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

Figura 46 - Objeto obtido pela impressora “multi-material” colorida J750, da Stratasys, que, atualmente constitui a última geração de equipamentos que utilizam a tecnologia Polyjet.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

Os equipamentos Polyjet possuem custo bastante elevado, superando o valor da linha Fortus (mencionada anteriormente), especialmente em relação à aquisição, mas o custo de operação também é superior ao de outros processos. Por exemplo, o equipamento Objet 1000 atualmente (fevereiro de 2017) custa por volta de US\$ 650.000,00 (seiscentos e cinquenta mil dólares).

4.2.6.1.2.2. 3D Systems

Segundo a Wikipédia, a empresa 3D Systems foi fundada em Valência, Califórnia, Estados Unidos, em 1986, por Chuck Hull, que inventou e patenteou o primeiro processo de modelagem tridimensional baseado em procedimento aditivo, que foi denominado de esterolitografia ou SLA (sigla derivada da expressão em inglês “*stereolithography apparatus*”).

A 3D Systems, assim como a Stratasys, também passou por um extenso processo de fusões e aquisições de outras empresas, e atualmente ela comercializa equipamentos que utilizam os seguintes processos: modelagem por fusão e deposição (FDM), esterolitografia (SLA), jateamento de fotopolímero (neste caso, denominado de “*Mult-jet Printing*” – MJP), jateamento de aglutinante sobre leito de pó (CJP), sinterização seletiva a laser (SLS) e impressão direta em metal (DMP, processo baseado em fusão de leito de pó).

Serão apresentados a seguir alguns dos equipamentos comercializados pela 3D Systems agrupados em função do processo que utilizam.

Modelagem por fusão e deposição (FDM)

A CubePro é a linha de impressoras tipo “*desktop*” que utiliza o processo FDM e é comercializada pela 3D Systems, que já foi abordada na seção 4.2.6.1.1 (Figura 34, página 92).

Estereolitografia (SLA)

Tal como já foi observado acima, o processo SLA original, patenteado em 1986 e fornecido até os dias de hoje pela 3D Systems, que utiliza o princípio da cuba de fotopolímero com configuração “*top down*” (que está detalhado no Apêndice 1), é o mais antigo entre os processos de modelagem tridimensional por adição de camadas e atualmente já tem sido considerado uma tecnologia antiquada, uma vez que existem outros processos, de desenvolvimento mais recente, que o têm substituído com vantagens, tais como aqueles baseados em jateamento de fotopolímero (MJP, da própria 3D Systems, ou Polyjet, da Stratasys).

Em relação aos seus aspectos negativos, destacam-se: o volume de resina necessário para dar início ao processo, a necessidade de estruturas de suporte, a necessidade de pós-processamento, a necessidade de pós-cura e a tendência de a peça degradar-se quando exposta a condições desfavoráveis de luz e calor.

No entanto, o processo SLA da 3D Systems obtém peças de qualidade excepcional em relação à precisão (“*accuracy*”) e acabamento superficial, dispõe de uma variedade de matérias (de uso geral e específico) e são adequados para peças de grandes dimensões (CHUA; LEONG, 2015).

Figura 47 - Peça obtida pelo equipamento de estereolitografia ProX 950, da 3D Systems.
Fonte: website do fabricante, acessado em agosto de 2017.

Figura 48 - À direita, impressora ProJet 1200, da 3D Systems.
À esquerda e ao centro, peças obtidas pela impressora.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

A linha de produtos da 3D Systems baseada nessa tecnologia atualmente é constituída de cinco equipamentos, sendo que o mais simples (ProJet 1200) é um modelo de pequeno porte que utiliza configuração “*bottom up*” (a luz é emitida de baixo para cima), não utiliza laser e é destinado especialmente para odontologia e joalheria.

Figura 49 - Impressora ProX 950, da 3D Systems.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2017.

O equipamento de maior porte da 3D Systems que utiliza o processo SLA, atualmente, é o modelo ProX 950, que pode produzir peças de até 1500 x 750 x 550 mm com uma resolução de até 4.000 DPI, segundo o fabricante. Pode utilizar uma variedade de tipos de resinas fotossensíveis agrupadas em oito classes, que incluem materiais que simulam polipropileno e ABS, materiais transparentes, materiais resistentes e duráveis, materiais para fundição, materiais resistentes a altas temperaturas e materiais de uso médico e odontológico.

Jateamento de fotopolímero (MJP)

A 3D Systems também disponibiliza, atualmente, outro processo baseado na cura de resina fotossensível, mas, neste caso, em vez da cuba de resina, utiliza um processo baseado em jateamento por cabeçotes tipo *“ink jet”* com cura simultânea por luz ultravioleta (similar e concorrente do processo Polyjet utilizado pela Stratasys), denominado *“Multi-jet Printing”* (MJP) e também conhecido como *“Multi-jet Modeling”* (MJM)

Os equipamentos que utilizam esse processo obtêm peças com excelente qualidade superficial (efeito escada quase imperceptível) e apresentam alta produtividade, em função da mesma peculiaridade apontada no processo Polyjet da Stratasys, ou seja, utiliza centenas de bicos de jateamento dispostos em linha ao longo de uma haste. Desta forma, o tempo de produção de uma pequena peça ou de uma bandeja totalmente ocupada é praticamente o mesmo.

Figura 50 - Peça obtida na impressora Projet 350 SD da 3D Systems.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2017.

O processo MJP produz peças monocromáticas em materiais que simulam ABS e polipropileno, além de um material especial translúcido de tonalidade âmbar-claro de alta durabilidade e resistência, e utiliza como material de suporte uma cera de baixo ponto de fusão que pode ser facilmente removida sem a utilização de produtos químicos ou equipamentos secundários.

A 3D Systems não possui impressoras baseadas no processo de jateamento de fotopolímero, que podem trabalhar com diversos tipos de materiais simultaneamente.

Jateamento de aglutinante sobre leito de pó (CJP, anterior 3DP da ZCorp)

Após a 3D Systems ter adquirido a ZCorp em 2013, passou a comercializar equipamentos com a tecnologia “*Color Jet Printing*” (CJP), anteriormente denominada 3DP (“*Tree Dimensional Printing*”).

Figura 51 - Impressora ProX 950, da 3D Systems, que utiliza o processo CJP (anteriormente denominado 3DP pela ZCorp)
Fonte: website do fabricante, acessado em janeiro de 2017.

A descrição do processo encontra-se no Apêndice 1, assim como os aspectos positivos e negativos apontados na bibliografia consultada, entre os quais destaca-se o fato de utilizar matérias-primas baratas (como gesso e amido), ser consideravelmente mais rápido que os demais processos e a possibilidade de obter peças totalmente coloridas. Os equipamentos CJP da 3D Systems depositam

camadas com 0,1 e 0,15 mm e podem apresentar resolução no plano XY de até 600 x 600 dpi (pontos por polegada quadrada), segundo informações do fabricante.

Figura 52 - Bonecos obtidos a partir de digitalização tridimensional e impressora CJP da 3D Systems (anteriormente denominado 3DP pela ZCorp).
Fonte: <http://www.jbennett.co.uk>, acessado em fevereiro de 2017.

Figura 53 - Modelo de aparência do tênis DMK, da Reebok obtido em impressora CJP (anteriormente denominado 3DP pela ZCorp).
Fonte: Hallgrimsson, 2012, p.70.

Durante muito tempo, foi o único processo de prototipagem aditiva que obtinha peças totalmente coloridas (*“full color”*), e apenas recentemente passou a ter a

concorrência do processo Polyjet, da Stratasys, no que diz respeito a essa característica.

Observou-se, em locais que dispõem desses equipamentos (particularmente escolas), que existe certa ociosidade, e apurou-se que isso ocorre porque o processo é considerado pouco amigável, uma vez que retirar a peça do leito de pó utilizando equipamento secundário é uma tarefa demorada, delicada e que exige certa experiência, e ainda é necessária infiltração com resina ou cera. O resultado final muitas vezes é pouco satisfatório em relação ao acabamento das superfícies, detalhamento e resistência mecânica.

Sinterização seletiva a laser (SLS)

A 3D Systems também comercializa uma linha de equipamentos que utiliza processo SLS (“*Selective Laser Sintering*”) que utiliza laser de alta potência para sinterizar a matéria-prima, que se encontra inicialmente em estado de pó (mais detalhes no Apêndice 1).

Apresenta como principal característica a capacidade de obter peças de alto desempenho, extremamente fortes e resistentes, que podem ser utilizadas como produtos finais ou para obter peças para linha de produção.

Figura 54 - Impressora sPro™ 60 HD, da 3D Systems, que utiliza o processo SLS.
Fonte: website do fabricante, acessado em janeiro de 2017.

Os equipamentos SLS da 3D Systems podem utilizar uma variedade de materiais proprietários, que incluem: termoplástico extraforte com propriedades mecânicas superiores, material reforçado com fibra de vidro, para excelente rigidez e resistência mecânica e térmica, plástico de engenharia similar a polipropileno e ABS, materiais flexíveis entre outros.

Figura 55 - Protótipo funcional de furadeira orbital.
A carcaça foi obtida pelo processo SLS, da 3D Systems.
Fonte: website do fabricante, acessado em janeiro de 2017.

Os equipamentos SLS possuem custo de aquisição bastante elevado (da ordem de um milhão de reais, em janeiro de 2017), e sua operação consome muita energia, acarretando custo de operação também elevado.

Um exemplo da confiabilidade desse processo foi sua utilização para obter um dispositivo utilizado pelo astronauta brasileiro Marcos Pontes para conduzir experimentos a bordo da Estação Espacial Internacional (ISS), segundo depoimento, transcrito a seguir, de Jorge Vicente Lopes da Silva, da Divisão para Desenvolvimento de Produtos do CTI Renato Acher, onde o objeto foi produzido, que ressalta as vantagens de utilizar SLS, em vez de tecnologias tradicionais:

O projeto inicial da cápsula previa sua fabricação em metal, mas isto se provou inviável tendo em vista que a cápsula ultrapassaria o peso limite de 3 Kg e exigiria soldas e conexões que poderiam romper devido às vibrações mecânicas que sofreria durante o lançamento. Utilizando a tecnologia de Sinterização Seletiva à Laser – SLS, produzimos a cápsula em poliamida, que além de ser um material muito mais leve do que o metal, proporcionou flexibilidade nas formas geométricas, um número mínimo de conexões, boa

resistência mecânica e estabilidade química.

(http://www.robtec.com/images/pdf/case_cenpra.pdf, acessado em janeiro de 2017)

A 3D Systems disponibiliza, ainda, outra linha de equipamentos, que utiliza o processo denominado DMP (*“Direct Metal Printing”*) e que obtém peças em metal por meio de fusão seletiva de pó metálico utilizando laser de alta potência. Além deste, existe atualmente uma variedade de processos destinados a obter peças metálicas com alta qualidade e produtividade e que serão discutidos a seguir.

4.2.6.1.3. Impressoras em metal

Observou-se que a expressão “Manufatura Digital Direta” (DDM, da sigla em inglês) tem sido utilizada, entre técnicos e em publicações (por exemplo, no verbete da Stratasys, na Wikipédia), para se referir a uma categoria de equipamentos de alta complexidade tecnológica utilizados para obter peças metálicas como produto final diretamente ou como componentes para serem utilizado em linha de montagem.

A diferenciação entre o que é e o que não é DDM não pode ser estabelecida claramente, porque, a rigor, qualquer equipamento, desde as impressoras *“desktop”* mais simples, pode ser utilizado para obter algum tipo de produto, e, como foi abordado no Item 4.2.1, todo o desenvolvimento do controle numérico computadorizado (CNC) se deu visando a sua utilização em linha de produção.

E mesmo considerando o caso de produtos mais complexos, submetidos a condições de utilização mais exigentes, a linha Fortus, da Stratasys (que utiliza o processo FDM), ou a linha de impressoras SLS, da 3D Systems, podem ser (e têm sido) usadas para obter produtos finais, notadamente na indústria aeroespacial, segundo o que foi apurado com os fabricantes.

Linhas de produtos intermediárias, como a linha Dimension, da Stratasys, também podem obter peças em ABS (e outros plásticos industriais) com qualidade equivalente à de peças obtidas por injeção.

Ainda assim, destaca-se que existe um terceiro grupo de equipamentos que atualmente correspondem à fronteira do desenvolvimento dessa tecnologia.

São equipamentos que utilizam processos baseados em fusão ou sinterização seletiva em camadas de pós metálicos utilizando laser de alta potência ou feixe de elétrons, com os quais é possível obter peças em aço, aço inoxidável, alumínio, bronze, titânio, níquel, inconel, cobalto-cromo, prata e ouro, com densidades muito próximas à de metais fundidos e apresentando qualidades mecânicas iguais ou superiores às de peças obtidas por usinagem ou fundição (não é superior apenas a peças forjadas, segundo o que foi apurado com especialistas).

Figura 56 - Impressoras em metal EOS M 400 que utilizam o processo DMLS.
Fonte: website do fabricante, acessado em fevereiro de 2017.

Os principais processos utilizados por esse grupo de equipamentos, e respectivos fabricantes, são os seguintes:

- SLS (*"Selective Laser Sintering"*) – 3D Systems.
- SLM (*"Select Laser Melting"*) – SLM Soluciones GmbH.
- EBM (*"Electron Beam Melting"*) – Arcam AB.
- DMP (*"Direct Metal Printing"*) – 3D Systems.
- DMLS (*"Direct Metal Laser Sintering"*) – EOS GmbH.

Ainda que esse grupo de equipamentos possua produtividade elevada e tenha sido desenvolvido visando sua utilização em ambientes de produção, eles poderiam ser

usados para obter protótipos funcionais ou componentes metálicos para protótipos, o que poderia ser de grande utilidade no processo de desenvolvimento do projeto, mas observa-se que os altíssimos custos envolvidos (aquisição, operação e manutenção) constituem um obstáculo para sua disponibilização em escritórios e escolas.

No entanto, o interesse em termos de produção industrial é imenso, e especula-se que o próprio conceito de indústria tem sido alterado com o desenvolvimento e disponibilização dessa tecnologia, o que poderia definir uma nova era, que alguns têm chamado de “a quarta revolução industrial”.

Se essa especulação tem se verificado de fato, é algo que deve ser abordado em um estudo específico, mas existem algumas características desse grupo de equipamentos que podem ser consideradas como inovadoras em relação às tecnologias de fabricação que existiam antes.

A possibilidade de associar a liberdade geométrica (possibilidade de obter qualquer geometria, desde as mais complexas), que é característica das tecnologias de modelagem tridimensional física computadorizada baseadas em processos aditivos, a materiais de altíssima resistência mecânica, como aço e titânio, entre outros, e softwares de análise estrutural para dar saída de peças em equipamentos de alta produtividade tem descortinado novas possibilidades para a engenharia de produtos.

Figura 57 - Exemplo de peça obtida por impressão tridimensional em metal.
Fonte: expositor da EOS na feira “Inside 3D Printing”, São Paulo, abril de 2016. Foto do autor.

Torna-se possível, por exemplo, aumentar o fator de resistência pela forma, o que possibilita diminuir a quantidade de material necessário para determinados componentes que desempenham função estrutural, o que, por sua vez, permite diminuir o peso total do produto, o que é crítico para determinadas indústrias, como a aeroespacial.

Segundo informações obtidas no site da EOS na internet, pesquisas nesse sentido foram realizadas pela EADS (European Aeronautic Defence and Space Company), uma empresa do grupo Airbus, que realizou testes comparativos entre componentes obtidos por processos tradicionais de fundição e pelo processo “*Direct Metal Laser Sintering*” (DMLS).

Tomando como corpo de prova um suporte de dobradiça, um componente altamente padronizado utilizado no projeto do avião Airbus A320, foi realizado redesign da peça, com o objetivo de reduzir custos durante a fase de operação (tipicamente cem vezes mais importantes que os custos da fase de fabricação, segundo o que foi considerado no contexto da pesquisa) por meio da redução do seu peso.

A peça teve sua geometria otimizada, utilizando o software de análise estrutural Altair HyperWorks, e foi produzida em titânio. (EOS, 2017)

Figura 58 - Suporte de dobradiça utilizado no projeto do Airbus A320. Esquerda: projeto original, para ser produzido em aço fundido. Direita: redesenho do mesmo componente para ser produzido em titânio pelo processo DMLS da EOS. Fonte: www.eos.info, consultado em fevereiro de 2017.

Concluiu-se que, apesar de o processo DMLS consumir mais energia para produzir a peça, foi possível obter os seguintes benefícios:

- Redução em 40% do consumo de energia durante todo o “ciclo de vida” do produto, incluindo fabricação e fase operacional.
- Redução em 75% da utilização de matéria-prima bruta.
- Possibilidade de reduzir o peso de aviões em até 10 Kg.
- Redução em até 40% da emissão de CO₂ durante todo o “ciclo de vida”.

Entre outras aplicações de peças obtidas em impressoras de metal, observou-se sua utilização no desenvolvimento de moldes de injeção para a fabricação de peças de plástico incorporando canais de arrefecimento que seguem de perto os contornos das peças, tornando possível aumentar a velocidade e diminuir o custo de produção (GRENDA,2009).

Também foi observado, em palestras realizadas na conferência *“Inside 3D Printing”* (realizadas em São Paulo no mês de abril de 2016), que a área médica tem sido muito beneficiada pela utilização de impressoras em metal, especialmente o setor de órteses e próteses, por meio da produção de implantes personalizados em titânio a partir de informações obtidas por tomografia computadorizada ou ressonância magnética.

Figura 59 - Outro exemplo de design otimizado: protótipo de um suporte Airbus A380 feito a partir de pó de aço inoxidável por DMLS. Atrás: o suporte convencional.

Fonte: website da EOS consultado em fevereiro de 2017.

Além dos casos citados aqui, certamente haverá uma infinidade de outras aplicações para esse desenvolvimento tecnológico, que não foram levantadas por fugir do escopo deste trabalho.

4.2.6.2. Processos subtrativos

4.2.6.2.1. Usinagem CNC

Hallgrimsson (2012) observa que os equipamentos utilizados em processos de modelagem tridimensional física computadorizada baseados em procedimentos subtrativos estão divididos em três grupos: (dois deles já discutidos no Item 4.2.3), prototipagem rápida subtrativa (SRP) e usinagem CNC, e um terceiro destinado à produção, denominado de “Centrais de usinagem CNC”.

Centrais de usinagem CNC

Figura 60 - Central de usinagem ROMI: equipamentos de grande porte para produção industrial.
Fonte: website do fabricante, acessado em fevereiro de 2017.

Este grupo é constituído de maquinário industrial pesado, desenvolvido inicialmente para cortar metal. Utilizam-se trocadores de ferramenta automatizados que permitem

realizar operações de fresagem, desbaste, perfuração, torneamento (HALLGRIMSSON, 2012).

Foram desenvolvidos para obter grande quantidade de peças idênticas com rígidas especificações de tolerância. Os custos elevados e os requisitos de energia e instalações restringem seu uso aos ambientes de produção (ibid.).

Fresadoras CNC

Figura 61 - Fresadora CNC tipo pórtico montada pela empresa Aviso em São Paulo.
Fonte: website do fabricante, acessado em fevereiro de 2017.

Este grupo refere-se aos equipamentos de grandes dimensões desenvolvidos inicialmente para trabalhos em madeira, para recortar contornos em chapas de derivados de madeira (MDF e compensados, entre outros).

Em geral, apresentam dimensões X e Y muito maiores que a dimensão Z e são geralmente descritos como máquinas do tipo pórtico, onde a moldura do pórtico move-se paralelamente ao longo de uma dimensão. A cabeça de corte é normalmente um motor de alta velocidade acoplado a uma fresa (ibid.).

Fresadoras CNC “desktop”

Os equipamentos que foram identificados anteriormente no Item 4.2.3 como prototipagem rápida subtrativa (SRP) são equipamentos de pequeno porte que não necessitam de instalações especiais (são instalados em um computador PC pela saída USB, como uma impressora) e podem ser operados em ambiente de escritório. Por esta razão, eles também têm sido denominados de “fresadoras CNC *desktop*” (Figura 62).

Figura 62 - Fresadora CNC “*desktop*” da Roland.
Fonte: website do fabricante, acessado em fevereiro de 2017.

Esse tipo de máquina trabalha bem com materiais como madeira, plástico e chapas de poliuretano e apresenta facilidade de operação, poucos resíduos e segurança de operação, o que o torna adequado para ser usado em escolas ou pequenas oficinas (ibid.).

Equipamentos como Roland MDX-540 têm sido desenvolvidos especificamente para oferecer facilidade de uso e segurança. Ela também é disponibilizada com trocadores de ferramenta e um quarto de eixo opcional (ibid.).

Configuração de uma fresadora CNC

De acordo com a bibliografia consultada (OVERBY, 2011), uma fresadora CNC é constituída basicamente de quatro elementos, descritos a seguir:

- um eixo rotativo no qual é acoplada a ferramenta de corte (fresa);
- um sistema de guias que conduzem os três movimentos ortogonais (x, y, z);
- um sistema de transmissão;
- e um conjunto de motores (no mínimo três) que comandam o posicionamento da ferramenta de corte.

O eixo rotativo pode ser obtido de duas formas: *“router head”* ou *“spindle head”* (ibid.).

“Router head” é um motor de indução normalmente utilizado em equipamentos destinados a laser ou fresadoras mais simples (*“entry level”*). Não é projetado para funcionar em conjunto com CNC, possui baixo custo e alto nível de ruído. No modelo mais comumente utilizado, de 3 hp, é possível selecionar a velocidade de rotação entre 10.000 e 21.000 rpm, com incrementos de 2.000 ou 3.000 rpm (ibid.).

“Spindle head” é fisicamente análogo ao *“router head”*, mas trabalha em conjunto com um drive eletrônico que permite controlar a rotação. É projetado para uma condição de operação mais rigorosa em equipamento CNC, portanto, possui uma arquitetura mais robusta. Geralmente trabalha com rotação de 18.000 a 24.000 rpm e apresenta potência que pode variar de 1,5 hp até 8 hp. Possui baixo nível de ruído, pode ser refrigerado a ar ou água e pode ser usado em conjunto com um dispositivo de troca automática da ferramenta de corte (ibid.).

O sistema que conduz os movimentos em um equipamento CNC é chamado de “guias lineares”, pois esse é o tipo de movimento que ele produz.

Existe uma quantidade muito grande de fabricantes de guias lineares, mas espera-se que todos eles forneçam as seguintes características (ibid.):

- movimento retilíneo, para a frente e para trás, ao longo de uma direção;
- movimento reto e liso (sem solavancos) e com atrito mínimo;
- orientação rigidamente ortogonal em relação às demais direções;

- folgas mínimas (“jogo”) entre o carro e a guia.

O sistema de transmissão é o método pelo qual a potência rotatória do motor é traduzida em movimento linear. Segundo a bibliografia consultada, quase todos os equipamentos CNC utilizam cremalheira e pinhão ou algum mecanismo de parafuso ou porca para produzir movimento retilíneo. Também existem sistemas híbridos, nos quais a guia e a transmissão estão incorporadas em uma única unidade (ibid.).

Os motores usados em equipamento CNC podem ser de dois tipos: motor de passo ou servomotor, conforme descritos a seguir (ibid.).

O motor de passo é utilizado na maioria de equipamentos destinados a laser ou aplicações intermediárias. Nesse tipo de motor, uma rotação completa do eixo é tipicamente dividida em duzentos incrementos de 1,8 grau (360° dividido por 200). Normalmente está acoplado a um drive que subdivide cada incremento por dez, totalizando 2 mil incrementos para completar uma rotação, que é controlada diretamente por uma informação numérica fornecida pelo software (ibid.).

Motores de passo são de baixo custo e apresentam boa precisão, ainda que não contem com dispositivo de verificação da posição, o que pode levar a acumular imprecisões durante o processo de usinagem (ibid.).

O servomotor requer um dispositivo denominado “*encoder*”, que controla e monitora o movimento. São mais caros, no entanto, mais rápidos e precisos (ibid.).

A construção de uma fresadora CNC de boa precisão e alta velocidade depende de uma especificação equilibrada de cada um desses elementos, que devem ser definidos em função do uso que se pretende para o equipamento e do orçamento disponível.

Foi verificado junto a fabricantes que os equipamentos de desempenho superior utilizam “*spindle head*” de alta potência (da ordem de 8 hp) associado a servomotores para controlar o movimento.

Usinagem unilateral ou bilateral

Uma fresa CNC de três eixos pode cortar apenas a partir do topo, o que significa que não existe nenhum corte inferior. Para obter uma peça com cortes inferiores, por exemplo, um ovo, ela precisa ser usinada em duas partes. Se o interior permanecer sólido, então a peça pode ser dividida em duas, e posteriormente essas partes podem ser unidas (HALLGRIMSSON, 2012).

Figura 63 - Exemplo de peça de paredes finas usinada em equipamento CNC de três eixos. A parte superior é usinada, e em seguida a peça é virada 180 graus em relação ao eixo horizontal. Note que os dois buracos foram usados para manter o registro e a pequena quantidade de material que permite ancorar a peça no quadro. Fonte: Hallgrimsson, 2012, p.77.

Um quarto eixo pode ser utilizado para girar a peça de trabalho automaticamente, de forma a usinar planos múltiplos. No entanto, caso não se disponha desse acessório, é possível obter peças com cortes inferiores e paredes finas mediante o planejamento do processo de usinagem em duas etapas. Isso requer que a peça de trabalho seja gerada manualmente e que sejam criados dois programas separadamente, um para a parte de cima e outro para a parte de baixo (ibid.).

4.2.6.2.2. Corte a laser

Segundo Hallgrimsson (ibid.), a flexibilidade e a velocidade do corte a laser estão sendo cada vez mais usadas em trabalhos com chapas de metal para criar contornos complexos para uma variedade de produtos.

Enquanto o laser industrial é um sistema de fabricação de grandes dimensões e muito complexo, pequenos lasers de CO² podem ser usados para cortar uma

variedade de materiais, desde chapas de plástico e papel até madeira, e têm sido utilizados com mais frequência em escolas (ibid.).

Os resultados são limitados a contornos bidimensionais (plano XY), e é possível criar a geometria de corte em programas gráficos baseados em vetor, tais como Corel Draw e Adobe Illustrator (ibid.).

Figura 64 - Equipamento de corte a laser da Universal.
Fonte: website do revendedor (Aviso), acessado em fevereiro de 2017.

Um aspecto importante a considerar é que a máquina requer exaustão para remover os gases criados quando o material é queimado (ibid.).

Laser de CO² também pode ser usado para gravação. Fotografias digitais podem ser usadas para criar motivos. Também é possível gravar metais, mas é necessária uma camada de recobrimento, *a priori*, para realizar o processo (ibid.).

4.2.7. Resumo

A tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada é composta de dois subgrupos: um que utiliza processos aditivos e outro que utiliza processos subtrativos.

As críticas feitas à utilização do termo “prototipagem rápida” baseia-se na falsa controvérsia que não considera que, neste caso, a palavra “prototipagem” está sendo utilizada para estabelecer uma referência de qualidade: equipamento que produz peças com qualidade suficiente para serem utilizadas na construção de um protótipo.

Portanto, a tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada pode ser subdividida em dois grupos: os processos que obtêm qualidade de protótipo (prototipagem rápida aditiva e subtrativa) e os processos que não obtêm qualidade de protótipo (impressão tridimensional e usinagem CNC).

Uma característica notável comum a todos os processos de modelagem tridimensional física computadorizada é a automação do processo, que separa o momento da definição da geometria e o da produção do objeto.

Processos aditivos oferecem completa ausência de limitações de ordem geométrica em alguns casos, limpeza e segurança de operação, possibilidade de dispensar montagens complexas, possibilidade de miniaturização, possibilidade de obter objetos em materiais diversos em um só processo, possibilidade de obter peças coloridas, redução de desperdício de material e operação amigável.

Existem alguns fatores que podem comprometer a precisão dos processos aditivos, e, além disso, destacam-se como fatores negativos a necessidade de estruturas de suporte, necessidade de operações secundárias, pouca variedade de materiais e, ainda, o fato de que são processos consideravelmente lentos.

Os processos subtrativos, por sua vez, oferecem a vantagem de poder usar uma variedade maior de materiais (o que pode ter impacto no custo), precisão em relação às dimensões definidas no modelo virtual, excelente acabamento, possibilidade de serem consideravelmente mais rápidos para determinadas geometrias e exigência menos rigorosa em relação ao modelo CAD 3D.

Em relação aos aspectos negativos dos processos subtrativos, destacam-se: restrições de ordem geométrica, condições de segurança, necessidade

de encapsular o equipamento, alto custo das ferramentas de corte, que se rompem com facilidade mediante erro de planejamento, necessidade de conhecimento para utilizar programas CAM, necessidade de conhecimentos básicos sobre prática de usinagem.

Uma limitação comum a todos os processos de modelagem tridimensional física computadorizada é a necessidade de perícia técnica para utilizar programas CAD 3D.

No panorama atual, existe uma grande variedade de equipamentos, tanto de processos aditivos como subtrativos, que vão desde pequenas impressoras “*desktop*” de custo reduzido, com as quais é possível obter peças com pouco rigor de acabamento, precisão e resistência mecânica, até poderosas impressoras em metal, com as quais se obtêm peças em aço, titânio e até mesmo ouro e prata e que têm revolucionado as técnicas de manufatura.

No próxima seção serão discutidas conveniências e adequações do uso desses recursos para obter representações de projetos de produtos, especialmente modelos de aparência, no contexto de exercícios didáticos em cursos de projeto de produto em escolas de design.

4.3. A utilização da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada para atender a demanda de modelos de aparência gerada por exercícios de projeto voltados para o ensino em design de produto

4.3.1. Introdução

Na seção 4.1 deste capítulo foram observadas as características de utilização de modelos tridimensionais físicos como meio de representação no processo de desenvolvimento de projetos de produtos destacando as características formais e construtivas do modelo de aparência que é um tipo de modelo de alta complexidade utilizado nas fases finais do desenvolvimento do projeto de um produto.

Na seção 4.2 buscou-se traçar um quadro detalhado da atual disponibilidade da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada, assim como suas principais características gerais e particulares de cada processo.

Esta seção tratará da adequação do uso da referida tecnologia em processos de obtenção de modelos de aparência destinados a atender à demanda gerada por exercícios de projeto de produtos em cursos de design.

Considerou-se, como pressuposto, que esta demanda possui as seguintes características:

- é necessário produzir certo número de modelos (a quantidade exata depende do número de alunos do curso);
- cada modelo deve representar um projeto diferente e, portanto, com características particulares;
- essa quantidade de modelos, cada qual de um projeto diferente, deve ser produzida no mesmo intervalo de tempo, uma vez que a data de entrega é a mesma para todos os alunos.

E considerou-se ainda que, neste contexto, incidem os seguintes requisitos imperativos:

- é necessário atender à demanda no menor intervalo de tempo possível;
- é necessário que o custo de produção de cada modelo seja o menor possível;

- é necessário que cada modelo apresente qualidade elevada de representação (ainda que não seja necessária a máxima qualidade possível).

Nas páginas a seguir, portanto, serão observados aspectos da operacionalização do referido recurso para obter modelos de aparência em uma situação particular, onde é necessário produzir certa quantidade de modelos, cada qual de um projeto diferente, otimizando prazos e custos e obtendo os possíveis benefícios na qualidade da representação.

4.3.2. Ponto de inflexão

Conforme foi destacado na introdução deste trabalho, a principal justificativa para a realização desse esforço de identificar formas de utilizar racionalmente o recurso de que se disponibiliza é a observação clara de um ponto de inflexão: com os recursos que se dispunha anteriormente havia limitações técnicas que se refletiam na qualidade final do modelo e também nos prazos necessários.

Com os recursos atuais essas limitações podem ser eliminadas, e os prazos podem ser drasticamente reduzidos. No entanto, para garantir os possíveis benefícios e controlar os custos e prazos envolvidos, é necessário refletir sobre como sistematizar sua utilização.

Figura 65 - Modelo de roda de bicicleta confeccionado pelo aluno Carlos Silveira para a disciplina de projeto de produto do curso de design da FAU USP em 2015. A simulação dos raios foi feita com traços de caneta sobre um disco acetato. Fonte: foto do autor.

Figura 66 - Modelo de bicicleta confeccionado utilizando-se processo Polyjet da Stratasys. Observa-se que a aparência é mais realista do que a do caso anterior.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

O exemplo da roda de bicicleta em escala é típico para ilustrar as limitações que existiam até então. Como pode se observar nas figuras a seguir, confeccionar uma roda raiada em uma escala que resultasse em um objeto final com diâmetro em torno de 8 cm (escala próxima de 1:10) era uma tarefa praticamente impossível, e era necessário recorrer a algum tipo de simulação que sugerisse a aparência desejada, nem sempre de forma convincente.

Com os recursos de que se dispõe atualmente, obter um componente de modelo com essa geometria intrincada é uma tarefa relativamente simples, desde que se disponha do equipamento necessário, e o resultado será muito superior em termos de qualidade de representação, como se pode observar na Figura 66.

O exemplo da Figura 66 suscita o seguinte questionamento: uma vez que se utiliza o recurso, então por que não obter o objeto todo, em vez de apenas um componente?

Em casos extremos como este, em que os demais componentes também implicariam em trabalho de grande dificuldade caso se utilizassem técnicas convencionais, a resposta é óbvia. No entanto, existem muitas outras situações em

que utilizar o mesmo recurso para obter o modelo completo pode não se mostrar conveniente em termos de custos ou prazos.

Para tais situações é necessário realizar um planejamento cuidadoso, levando-se em conta uma série de variáveis que serão discutidas a seguir.

4.3.3. Recursos “*high end*” para obter modelos de aparência de forma automatizada

Conforme foi observado na seção 4.1, o modelo de aparência tem exigências muito rigorosas quanto à representação de detalhes, acabamentos, texturas, transparências, cores, brilhos, gráficos, textos etc., de forma a simular a aparência final do produto com alto nível de realismo.

Para obter modelos com essas características, alguns processos de modelagem tridimensional física computadorizada têm sido constantemente desenvolvidos, incorporando e aprimorando propriedades que proporcionem realismo cada vez mais “fotográfico”.

Figura 67 - Modelo de aparência de furadeira obtido pelo equipamento Objet 260 Connex 3, da Stratasys, que utiliza o processo Polyjet.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

Figura 68 - Modelo de aparência de capacete de ciclista obtido pelo processo Polyjet, da Stratasys.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

Neste sentido, sugiram equipamentos com capacidade de produzir peças coloridas, com excelente acabamento superficial (“efeito escada” imperceptível, ou quase), com alta resolução (capacidade de obter pequenos detalhes) ou que podem depositar diferentes materiais simultaneamente.

Em relação à cor, duas tecnologias se destacam: CJP, da 3D Systems (anteriormente denominado de 3DP, quando pertencia à ZCorp), e Polyjet, da Statasys, ambas mencionadas na seção 4.2.

O processo Polyjet é, sem sombra de dúvida, o que existe de mais completo com relação à possibilidade de obter modelos de aparência realísticos, uma vez que deposita camadas mais finas (da ordem de centésimos de milímetros), obtém peças coloridas, em diversos materiais simultaneamente e com excelente detalhamento.

O processo CJP não é “*multimaterial*”, deposita camadas mais espessas (da ordem de décimos de milímetros), mas também é capaz de obter resultados de alta qualidade em determinadas situações, como pode ser observado na Figura 69.

Figura 69 - Modelo de um conjunto automotivo obtido pelo processo CJP, da 3D Systems.
Fonte: website do fabricante, acessado em dezembro de 2016.

No entanto, ainda que esses exemplos apresentem resultados impressionantes em termos de qualidade de representação, quando são observados com olhar mais atento, considerando a possibilidade de utilizar-se esse recurso para a obtenção de modelos de aparência de qualquer tipo de produto, percebe-se que ele só é útil, de fato, para um tipo muito particular, no qual os materiais têm certa similaridade e não existem diferenças muito significativas de acabamentos, como brilhos, texturas e transparências.

É relevante o fato de que ambos os fabricantes (Stratasys e 3D Systems) apresentem o modelo de um calçado (tênis) em seus respectivos websites na internet para ilustrar as capacidades de seus equipamentos, como se pode observar na Figura 70.

Figura 70 - Modelos de aparência obtidos por processos automatizados
Esquerda: processo CJP, da 3D Systems. Direita: processo Polyjet, da Stratasys.
Fonte: websites dos fabricantes, acessados em dezembro de 2016.

Os custos também são um fator a se considerar. No caso do processo Polyjet, o equipamento tem um custo muito elevado (pode chegar a valores acima de 500 mil dólares, em valores de janeiro de 2017) e utiliza matérias de consumo proprietários (fornecido pelo fabricante), que também são caros. O processo CJP é mais barato, mas a variedade de situações que ele pode atender é bem menor.

Desta forma, conclui-se que disponibilizar equipamentos dedicados a obter modelos de aparência realistas, de que se dispõe atualmente, em escolas de design e utilizá-los como único recurso para atender à demanda de modelos de aparência gerada por exercícios de projeto de produto não seria adequado, porque seria muito caro e só atenderia com alta qualidade uma quantidade limitada de situações.

4.3.4. Rotas alternativas para atender à demanda de modelos de aparência gerada por exercícios de projeto em escolas de design

O processo de confecção de um modelo, de qualquer tipo, mas particularmente de um modelo de aparência, não pode ser determinado de forma apriorística por meio da descrição de um procedimento de validade geral, tal qual uma receita de bolo. Em outras palavras, esse não é um processo algorítmico, ou seja, uma “sequência de operações que podem ser repetidas exaustivamente e que, em teoria, garantem a solução de um problema” (STERNBERG, 2010, p.391).

Em geral, parte-se de uma hipótese inicial de trabalho, e na medida em que esta é colocada em prática, ela é, muitas vezes, modificada ou abandonada, caso se mostre excessivamente trabalhosa, demorada ou não apresente resultados satisfatórios, o que significa dizer que se trata de um processo heurístico, que se caracteriza por “estratégias informais, intuitivas e especulativas que conduzem, algumas vezes, a uma solução eficaz e, outras vezes, não” (Ibid., p.391).

A disponibilização de recursos de modelagem tridimensional física computadorizada não modifica essa abordagem, ao menos no contexto de disciplinas de projeto de produto em escolas de design, como se verá a seguir.

Segundo Hallgrimsson (2012, p.44, tradução do autor), “Sempre existem opções para fazer um modelo e nunca haverá uma resposta simples, perfeita e correta”.

O mesmo autor também observa que, devido aos altos custos dos materiais utilizados por equipamentos de prototipagem aditiva, especialmente os que utilizam materiais exclusivos fornecidos pelo fabricante, como no caso da tecnologia Polyjet, apontada na seção anterior, frequentemente torna-se necessário considerar rotas de modelagem menos dispendiosas e que envolvem uma abordagem alternativa.

Tal como foi apontado na seção 4.1, a possibilidade de desmembrar um modelo de aparência em componentes que serão confeccionados separadamente e depois montados é um procedimento que se beneficia enormemente de uma característica particular dos processos de modelagem tridimensional física computadorizada, apontada na seção 4.2, que é a alta precisão, o que possibilita produzir componentes paralelamente, por processos variados, com a certeza de que todos eles se ajustarão perfeitamente uns aos outros.

Este procedimento pode ser muito útil para a definição de rotas alternativas de confecção do modelo porque torna possível avaliar cada componente individualmente e buscar uma solução particular para cada um deles, evitando a utilização de recursos caros e lentos onde eles não são necessários.

Por exemplo, o modelo mostrado na Figura 71, confeccionado para a conclusão do curso de design da PUC do Rio de Janeiro, foi produzido quase que inteiramente pelo aluno utilizando uma impressora FDM “*desktop*” (com exceção de alguns componentes que foram obtidos por corte a laser e outros em que foi utilizado arame de alumínio).

O resultado é bastante razoável, ainda que apresente alguns problemas de acabamento que só são percebidos olhando de perto.

Figura 71 - Modelo de aparência de uma embarcação confeccionado pelo aluno Mairê Ramazzina para trabalho de conclusão do curso de design da PUC-Rio de Janeiro em junho de 2015.

Fonte: foto do autor.

No entanto, o procedimento utilizado só se tornou viável porque o aluno possuía uma impressora desse tipo em sua residência, tendo em vista que o tempo total de impressão foi por volta de 30 horas. Se ele utilizasse um equipamento disponibilizado pela escola, provavelmente teria que fazer uso exclusivo dele por alguns dias.

Porém, algumas partes desse modelo poderiam ser obtidas utilizando-se fresadora CNC usinando espuma de poliuretano de alta densidade ou mesmo MDF, o que costuma ser consideravelmente mais rápido que os procedimentos aditivos e possibilitaria duas frentes de trabalho simultâneas, diminuindo muito o tempo total de produção.

A Figura 72 mostra outro exemplo que ilustra a mesma ideia: o modelo de cafeteira, confeccionado como peça de demonstração pelo representante comercial da marca Stratasys no Brasil, foi obtido utilizando-se quase que exclusivamente equipamento de prototipagem aditiva, resultando em tempo total de impressão da ordem de 25 horas.

Figura 72 - Modelo de cafeteira em exposição no “show room” do representante da marca Stratasy no Brasil. Nota-se que o corpo da jarra não apresenta uma geometria complexa que justifique utilizar prototipagem aditiva. Fonte: foto do autor.

No entanto, se fosse considerada uma abordagem de procedimentos combinados, o corpo da jarra, por exemplo, poderia ser confeccionado utilizando-se um torno convencional, ou mesmo uma fresadora CNC, enquanto os demais componentes, de geometria mais complexa, seriam produzidos por prototipagem aditiva.

O objeto mostrado na Figura 73 (arma utilizada pelo personagem Han Solo no filme *Star Wars*) foi produzido utilizando-se exclusivamente uma impressora FDM “desktop”, o que levou treze horas.

Se fosse utilizada a abordagem proposta, o corpo da peça poderia ser usinado em CNC, talvez em MDF, as partes cilíndricas do dispositivo de mira poderiam ser feito manualmente utilizando papel craft e cola, enquanto as peças de geometria mais intrincada seriam impressas, reduzindo o tempo total e provavelmente também o custo de produção.

Figura 73 - Reprodução da arma utilizada pelo personagem Han Solo no filme *Star Wars*. Esse objeto foi feito utilizando-se impressora FDM “desktop” com acabamento posterior. Tempo de impressão: treze horas. Fonte: modelo e foto por André Luiz Marques.

4.3.5. Tecnologias adequadas ao nível de complexidade de cada componente do modelo

Considerando a abordagem proposta na seção anterior, observa-se que existem, de um lado, diversos níveis de complexidade relativos aos diversos componentes que constituem um modelo de aparência, e, por outro lado, uma variedade de recursos que podem ser utilizados.

Combinar e ajustar as duas variáveis de forma adequada, dentro de uma estratégia direcionada a atender a demanda de modelos de aparência gerada por exercícios de projeto em escolas de design, torna possível reduzir os custos e otimizar os prazos.

Os recursos de que se dispõe podem ser descritos da seguinte forma:

- “*ready made*”, ou seja, componentes “de prateleira”, objetos que já se encontram prontos, como tubos, tarugos, chapas, fios e toda a variedade de objetos industrializados que podem atender a uma necessidade de representação de forma imediata;
- procedimentos tradicionais, de caráter artesanal, utilizando-se ferramentas manuais ou máquinas convencionais;
- usinagem CNC e corte a laser;
- impressão tridimensional e prototipagem.

“Ready made” e procedimentos tradicionais devem ser priorizados sempre que possível. Por exemplo, se uma parte do modelo é constituída de um tubo com 50 milímetros de diâmetro e alguns centímetros de comprimento, será mais rápido e barato cortar um pedaço de tubo de PVC, em vez de perder horas imprimindo.

Da mesma forma, se o componente de que se necessita em determinado momento, por exemplo, é uma peça quadrada com 10 centímetros de aresta e 10 milímetros de espessura com um furo de 8 milímetros ao centro, o procedimento mais rápido e barato, sem a menor sombra de dúvida, será cortar um pedaço de MDF com essas dimensões, utilizando uma serra circular, e fazer o furo utilizando furadeira de bancada e broca.

Usinagem CNC associada, ou não, ao corte a laser, por sua vez, é capaz de atender a uma gama muito grande de situações, com qualidade, velocidade e custo baixo.

Figura 74 - Modelo de aparência de telefone celular confeccionado utilizando usinagem CNC e corte a laser. Procedimentos combinados possibilitaram reduzir custos e prazos.

Fonte: modelo confeccionado pelo autor e foto do autor.

Por exemplo, o modelo de aparência de telefone celular mostrado na Figura 74 foi feito utilizando-se exclusivamente usinagem CNC e corte a laser, e o resultado final é bastante realista. Neste caso, a abordagem de procedimentos combinados também possibilitou reduzir os custos, uma vez que se utilizou “*Cibatool*” (um poliuretano especial para usinagem que possui custo elevado) apenas onde ele era necessário (no teclado), e no restante do “corpo” do aparelho utilizou-se um material mais barato (acrílico).

Figura 75 – Processo de confecção de modelo de apresentação de drone por alunos da disciplina de projeto de produto no curso de design da FAU USP, em junho de 2015.

Foi utilizada usinagem CNC para obter um “corpo” em espuma de poliuretano, sobre o qual foram adicionados outros componentes obtidos por outros processos. Fonte: foto do autor.

Outro exemplo é o modelo mostrado na Figura 75, que foi confeccionado para disciplina de projeto de produto do curso de design da FAU USP. Utilizou-se usinagem CNC para obter-se o volume principal do projeto, em espuma de poliuretano, que recebeu acabamento posterior em massa de PVA (massa

corrida) e lixa. Sobre esse “corpo” foram adicionados outros componentes, obtidos por outros processos.

Nesse caso, a abordagem de procedimentos combinados liberou tempo de máquina, que foi utilizado por outras equipes.

E, por fim, existirão situações em que “*ready made*”, procedimentos tradicionais ou usinagem CNC e corte a laser não serão suficientes para obter um resultado satisfatório. Por exemplo, a Figura 76 mostra um modelo confeccionado para a mesma disciplina do caso anterior (Figura 75), onde também foi adotada a abordagem de procedimentos combinados, mas os procedimentos utilizados para produzir os detalhes mais delicados (como a grelha de proteção da hélice) não resultaram em uma representação com qualidade aceitável.

Figura 76 - Modelo de apresentação de drone confeccionado por alunos para a disciplina de projeto de produto no curso de design da FAU USP, em junho de 2015. Foi utilizada usinagem CNC para obter um “corpo” em espuma de poliuretano, sobre o qual foram adicionados outros componentes obtidos por outros processos. Fonte: foto do autor.

Esse é um caso que se beneficiaria da utilização de um equipamento mais sofisticado de modelagem tridimensional física computadorizada baseada em adição de camadas que, conforme foi observado, estão divididos em três grupos, entre os quais, dois são de interesse para a confecção de modelos: impressoras “desktop” e equipamentos para prototipagem.

Figura 77 - Acabamento realizado em peça obtida por impressora FDM “desktop” com pronunciado “efeito escada”. Fonte: Hallgrimsson, 2012, p. 159.

Existem impressoras “desktop” que utilizam os processos FDM e SLA. As que utilizam o processo FDM conseguem atender a várias situações em que o acabamento superficial, especialmente, não é muito importante, ou existe a

possibilidade de realizar pós-acabamento com massa e pintura, conforme é exemplificado na Figura 77. Impressoras “desktop” SLA apresentam acabamento superior, mas o processo é pouco amigável (como está detalhado na seção 4.2). Em ambos os casos, resistência mecânica não pode ser um fator crítico e a geometria da peça não deve exigir estruturas de suporte muito elaboradas.

Figura 78 - Exemplo de peça de geometria complexa obtida por impressora “desktop” (conector de estrutura metálica para ser usado em uma maquete de arquitetura). Nota-se que a qualidade obtida é muito precária. Para um caso como este, seria mais adequado utilizar um equipamento de prototipagem aditiva mais sofisticado: Fonte: foto do autor.

E para situações limite, que não podem ser atendidas por nenhum dos processos considerados até aqui, haverá a possibilidade de utilizar equipamentos de prototipagem aditiva mais sofisticados.

Neste caso, os processos FDM (empregados em equipamentos de prototipagem, conforme classificação proposta na seção 4.2.3) e jateamento de fotopolímeros são opções que se destacam.

Entre os equipamentos que utilizam o processo FDM, as linhas uPrint e Dimension, da Stratasys, seriam opções mais baratas, com valores da ordem de R\$ 100.000,00, e oferecem, como diferenciais, cabeçote de impressão exclusivo para depositar matéria de suporte solúvel em solução aquosa e condições controladas para utilizar filamentos de ABS, o que resulta em peças de alta resistência mecânica.

Figura 79 - Exemplo de peça de geometria complexa obtida por equipamento Dimension Elite, da Stratasys, que utiliza o processo FDM.
Fonte: website do fabricante, acessado em janeiro de 2017.

A linha Mojo, também da Stratasys, apresenta custo inferior, mas o envelope de construção é um dos menores disponíveis (127 x 127 x 127 mm) e, portanto, só consegue obter peças muito pequenas.

E entre os equipamentos que utilizam o processo de jateamento de foto polímero, destacam-se a linha Objet, da Stratasys, e a linha que utiliza o processo MJM da 3D Systems, ambos muito similares e concorrentes.

Figura 80 - Exemplos de peças de geometria complexa obtidas por equipamento que utilizam o processo MJM, da 3D Systems, baseado em jateamento de fotopolímero.
Fonte: website do fabricante, acessado em janeiro de 2017.

Figura 81 - Exemplos de peças de geometria complexa obtida por equipamento da linha Objet, da Stratasys, que utiliza o processo de jateamento de fotopolímero.
Fonte: website do fabricante, acessado em janeiro de 2017.

As principais diferenças entre os equipamentos de prototipagem que utilizam jateamento de fotopolímero em relação aos que utilizam o processo FDM são: resistência mecânica inferior, tendência a se deformar quando expostos a condições desfavoráveis de luz e temperatura e custos (do equipamento e dos materiais de consumo) que são superiores, mas, em contrapartida, são equipamento de maior produtividade, conforme está detalhado na seção 4.2.

Figura 82 - Modelo de aparência obtido utilizando o processo CJP, da 3D Systems. Observa-se que a possibilidade de saída totalmente colorida é útil para obter textos e rótulos.
Fonte: "show room" do fabricante, foto do autor.

Os equipamentos que utilizam o processo CJP, da 3D Systems, não oferecem resolução e acabamento tão superiores como os processos FDM (utilizados em equipamentos de prototipagem, e não impressoras “*desktop*”) e jateamento de fotopolímero. No entanto, é um processo relativamente rápido e barato, e a possibilidade de obter peças totalmente coloridas pode ser útil para obter textos e rótulos, conforme está exemplificado na Figura 82.

Os demais processos, notadamente aqueles baseados em sinterização e fusão seletiva a laser (SLS, SLM, EBM, entre outros), são utilizados em equipamentos extremamente sofisticados e caros e obtêm peças de alta qualidade (especialmente resistência mecânica muito elevada, que em alguns casos pode ser até mesmo superior à de peças obtidas por processos industriais), e não devem ser considerados para o caso de confecção de modelos de aparência. Esses equipamentos são mais indicados para o caso de construção de protótipos.

4.3.6. Proposta de abordagem para utilização de tecnologias de modelagem tridimensional física computadorizada na confecção de modelos de aparência no contexto de exercícios de projeto voltados para o ensino em design de produto

Tendo em vista que o objetivo é atender a demanda por modelos de aparência gerada por exercícios de projeto de produto em escolas de design, tal como foi caracterizada na introdução deste capítulo, e considerando que todos os dados coletados e analisados permitem concluir que:

- a) a usinagem CNC tende a ser um processo consideravelmente mais rápido que os processos aditivos para determinadas geometrias;
- b) a usinagem CNC tende a ser mais barata que os processos aditivos, uma vez que não utiliza material proprietário;
- c) a usinagem CNC apresenta restrições de ordem geométrica (o que não ocorre com determinados processos aditivos);

d) existem processos aditivos de baixo custo, mas que apresentam restrições em relação à qualidade das peças produzidas;

e) e que os processos aditivos “*high end*” (que não apresentam restrições de ordem geométrica) são consideravelmente mais caros (equipamento, material proprietário, operação e manutenção).

Propõe-se a seguinte sequência de avaliações para definir que processos e equipamentos serão utilizados em cada caso específico:

1ª avaliação

O modelo que se pretende obter pode ser desmembrado em elementos que serão confeccionados de forma independente e posteriormente montados? E esse desmembramento constitui uma vantagem estratégica no processo de confecção do modelo?

Exemplos:

a) O modelo de aparência de um automóvel pode ser desmembrado em lataria, vidros, pneus e demais detalhes de escala reduzida, como retrovisor, para-brisas, para-choques etc.

Esse desmembramento constitui vantagem estratégica no processo de confecção do modelo, uma vez que cada um desses elementos possui características próprias de acabamento, como cor, brilho, transparência e textura e, portanto, torna-se mais simples obter esse acabamento trabalhando-se em cada peça de forma independente.

b) Um cinzeiro constituído por um sólido de revolução não pode ser desmembrado. Em caso afirmativo para a primeira avaliação (ou seja, o modelo que se pretende obter pode ser desmembrado em sub-elementos, com vantagens para o processo de confecção), as avaliações a seguir deverão ser realizadas para cada um dos sub-elementos. Em caso negativo, as avaliações a seguir deverão ser realizadas para o único elemento que constitui o modelo.

2ª avaliação

A utilização da tecnologia em estudo é realmente necessária?

Existe algum produto comercial que pode ser utilizado, como chapas, tubos, tarugos, fios etc. (*“ready made”*)?

Existe algum processo convencional que possa ser utilizado para obter a peça necessária de forma rápida, barata e com bom acabamento?

Em caso afirmativo, descarta-se a utilização da tecnologia em estudo. Em caso negativo, passa-se à próxima avaliação.

3ª avaliação

É possível obter a peça necessária por usinagem CNC utilizando-se material de baixo custo (por exemplo, MDF, acrílico, espuma de poliuretano ou poliestireno) ou corte a laser? Em caso negativo, passa-se à próxima avaliação.

4ª avaliação

É possível obter a peça necessária por usinagem CNC utilizando-se *“Cibatool”* (poliuretano especial para usinagem)? Em caso negativo, passa-se à próxima avaliação.

5ª avaliação

É possível obter a peça necessária utilizando-se uma impressora tridimensional tipo *“desktop”*? Em caso negativo, lança-se mão de um processo de prototipagem aditiva mais sofisticado e caro.

Por meio do procedimento descrito, será assegurado que a demanda por modelos de aparência, gerada por disciplinas de projeto de produto em escolas de design, será atendida, otimizando-se prazos e custos e assegurando-se os possíveis benefícios que a tecnologia de modelagem tridimensional computadorizada pode proporcionar.

Capítulo 5: Conclusões

Tendo observado que:

O processo de desenvolvimento do projeto de produto é orientado por métodos que são nada mais que uma sequência de etapas lógicas e racionais que tem por objetivo obter o melhor resultado valendo-se de recursos necessários e suficientes.

Por razões metodológicas, o processo de projeto evolui em complexidade partindo de questões abstratas, de caráter geral, até chegar à especificação de todos os aspectos concretos do futuro produto.

Nesse desenvolvimento utiliza-se um elenco de tipos de modelos tridimensionais físicos, que mantêm um vínculo estreito com a metodologia de projeto e também evoluem de modelos muito simples, utilizados nas fases iniciais, até modelos de alta complexidade utilizados nas fases finais, entre os quais se destaca o modelo de aparência e o protótipo.

A pesquisa realizada centrou atenção em modelos de aparência, tendo em vista que é um tipo largamente empregado em exercícios de projeto em cursos de design e apresenta características que podem se beneficiar em grande medida da utilização da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada.

Esse tipo de modelo deve simular a aparência final do produto com alto nível de realismo, de tal forma que o modelo de aparência perfeito é aquele que, valendo-se apenas da observação, não é possível saber se se trata de modelo ou produto.

Tal realismo é praticamente impossível obter, mas para que se aproxime ao máximo é necessário representar toda a geometria do produto com grande precisão, além de todos os detalhes, acabamentos, diferenças de materiais, texturas, transparências, cores, brilhos, gráficos, textos etc.

Por outro lado, a tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada é constituída de dois grupos fundamentais de equipamentos: um que utiliza

procedimentos baseados na adição de material em camadas, e outro baseado na subtração de material de um bloco inicial utilizando-se ferramentas de corte.

Uma característica notável em ambos os casos é a possibilidade de automação do processo, da qual decorrem algumas vantagens, como a independência da necessidade de habilidades manuais e alta precisão das peças.

Existem vantagens e limitações inerentes tanto aos processos aditivos quanto aos processos subtrativos.

Uma limitação que sempre se faz presente quando se cogita utilizar tecnologias de modelagem tridimensional física computadorizada é a necessidade de perícia técnica e operacional para se utilizar programas CAD.

Observou-se também que os equipamentos que utilizam a tecnologia em estudo atualmente estão distribuídos da seguinte forma:

- em relação aos que utilizam procedimentos aditivos, existem impressoras “*desktop*”, equipamentos para prototipagem e produção, além das impressoras em metal;
- em relação aos que utilizam procedimentos subtrativos, existem as fresadoras CNC “*desktop*”, também denominadas de “prototipagem rápida subtrativa” (SRP), fresadoras de porte de oficina e centrais de usinagem, além dos equipamentos de corte a laser.

Então, em resumo, considerou-se o seguinte panorama: de um lado estão os modelos tridimensionais físicos de maior complexidade, entre os quais se destaca o modelo de aparência, que representa a aparência final do produto com alto nível de realismo, e de outro lado está uma ampla variedade de recursos que se somam aos recursos que já se utilizavam anteriormente, baseados em procedimentos manuais de caráter artesanal.

Tendo em vista, tal como foi observado, que processos totalmente automatizados para obter modelos de aparência com alto realismo são extremamente caros e só obtêm bons resultados em algumas situações, considerou-se que se torna

necessário definir rotas alternativas menos dispendiosas para o processo de confecção do modelo.

Observou-se que uma característica construtiva do modelo de aparência, que é a necessidade de desmembrar o modelo em diversos componentes que serão obtidos separadamente e depois montados, se beneficia de uma característica inerente dos processos de modelagem tridimensional física computadorizada, que é a alta precisão do processo e pode ser muito útil para a definição de rotas alternativas porque permite que cada componente seja avaliado separadamente em relação aos recursos que serão utilizados na sua produção e torna possível empregar a tecnologia adequada a cada caso.

Essa abordagem não desconsidera que o processo de confecção de um modelo de aparência é um processo heurístico que deve ser definido levando-se em conta várias condicionantes, tais como: disponibilidade de materiais, disponibilidade de máquinas e ferramentas, prazos, orçamento de que se dispõe, habilidades e preferências de quem faz o modelo, disponibilidade de perícia técnica e operacional para utilizar programas CAD.

No entanto, a abordagem proposta possibilita evitar que se utilize um processo caro e demorado onde ele não é necessário.

Procedendo desta forma, se verá, então, que existem quatro situações possíveis, descritas a seguir.

- A tecnologia em estudo não é útil para que se obtenha o componente necessário, porque existe um processo convencional que pode ser utilizado de forma rápida, barata e com qualidade. Por exemplo: os dois segmentos de tubo que compõem o dispositivo de mira do objeto mostrado na Figura 73 (página 141). Poder-se-ia obter apenas a peça de conexão entre os dois elementos por impressão tridimensional, o que agilizaria o processo.

- A tecnologia em estudo combina-se com um procedimento convencional com vantagens. Por exemplo: os textos do teclado do telefone celular mostrado na Figura

74 (página 142) foram obtidos pelo rebaixamento das letras, o que foi possível graças à precisão da usinagem CNC. Posteriormente a peça foi pintada, e o baixo relevo foi preenchido com massa corrida, que é um recurso que se utiliza tradicionalmente para marcar caixilhos sobre peças de acrílico em algumas escalas de maquetes de arquitetura.

- A tecnologia em estudo substitui paulatinamente os procedimentos tradicionais, uma vez que o resultado é tão superior que já não faz mais sentido recorrer a simulações precárias. Por exemplo: a roda de bicicleta mostrada nas Figuras 66 (página 133).

- E, finalmente, existem situações em que a tecnologia em estudo não só substitui a forma como se fazia antes, mas também possibilita obter formas que antes eram impossíveis até mesmo de serem simuladas de forma precária. O mesmo teclado de telefone celular citado é um exemplo deste caso: antes não existiam recursos que se pudessem utilizar para obter uma geometria tão sutil em escala tão pequena, ao menos que se recorresse a simulações simplificadoras.

Pelas considerações feitas acima, conclui-se que a tecnologia em estudo representa, de fato, um ganho substancial e que a sua utilização racional pode minimizar custos, otimizar prazos e viabilizar uma produção de modelos de aparência com alta qualidade de representação.

Por fim, vale destacar que, ainda que toda a investigação realizada tenha sido conduzida visando empregar o recurso que ora se disponibiliza em processos de obtenção de modelos de aparência, que é um modelo de alta complexidade, o processo de confecção de outros tipos de modelos, de menor complexidade, também é beneficiado pelas mesmas conclusões.

Por exemplo: para se avaliar que recurso será utilizado para obter diversas opções de pega para o cabo de um serrote, a mesma sequência de avaliações proposta pode ser utilizada, e a conclusão será que é possível obter qualidade e velocidade, neste caso, utilizando usinagem CNC e usinando materiais de baixo custo.

Desta forma, ao centrar a atenção em modelos de aparência, estabelecem-se critérios que podem ser utilizados para orientar a composição e a utilização do maquinário em oficinas de modelagem em escolas de design, com consequências para o processo pedagógico, que passa a contar com um processo mais eficiente de confecção de modelos.

Apêndice 1: Descrição dos principais processos da tecnologia de modelagem tridimensional física computadorizada baseados em adição de material

De acordo com a norma ISO/ASTM 52900 de 2015, da “*American Society for Testing and Materials*” (ISO/ASTM, 2017), que normatizou a terminologia padrão para Manufatura Aditiva (AM, da sigla em inglês – termo que é adotado por essa instituição para designar as tecnologias de modelagem tridimensional física computadorizada baseadas em adição de material), existem sete categorias, descritas a seguir.

- 1) Cuba de fotopolimerização (“*vat photopolymerization*”): processo no qual um fotopolímero líquido em uma cuba é curado seletivamente por luz.
- 2) Fusão em leito de pó (“*powder bed fusion*”): processo no qual energia térmica funde seletivamente regiões de um compartimento preenchido com matéria-prima em pó.
- 3) Extrusão de material (“*material extrusion*”): processo no qual o material é dispensado seletivamente através de bocal ou orifício.
- 4) Laminação em folhas (“*sheet lamination*”): processo no qual folhas de material são unidas para formar a peça.
- 5) Jateamento de material (“*material jetting*”): processo no qual gotas de material (por exemplo, fotopolímero ou cera) são depositadas seletivamente.
- 6) Jateamento de aglutinante (“*binder jetting*”): processo no qual um agente aglutinante líquido é depositado seletivamente para unir material em pó.
- 7) Deposição com energia direcionada (“*directed energy deposition*”): processo no qual energia térmica focada é usada para fundir material à medida que é depositado.

A seguir serão apresentados os principais processos de cada categoria.

1) Cuba de fotopolimerização (“vat photopolymerization”)

O processo que utiliza esse princípio é denominado de estereolitografia, que é conhecido pela sigla SLA (da expressão em inglês “*Stereolithography Apparatus*”).

Figura 83 - Ilustração esquemática do processo de estereolitografia.
Fonte: Grenda, 2009, p.11.

Figura 84 - Peça obtida pelo equipamento de estereolitografia ProX 950, da 3D Systems.
Fonte: website do fabricante, acessado em agosto de 2015.

Em resumo, o processo é o seguinte: a plataforma móvel é posicionada abaixo da superfície da cuba preenchida com resina fotossensível em estado líquido, a uma distância igual à espessura de uma camada. Um feixe de laser é deslocado sobre

essa superfície, rastreando a geometria da secção transversal da peça, endurecendo a resina. Após finalizar uma camada, a plataforma é deslocada para baixo, e o processo se repete, camada por camada, até completar o objeto. A plataforma é elevada, a peça é retirada, e o excesso de resina é removido manualmente. Em alguns equipamentos é necessário pós-cura em dispositivo específico.

As principais vantagens desse processo são:

- precisão e acabamento superficial (GREND, 2009; HAUSMAN; HORNE, 2014; VOLPATO, 2007; CHUA; LEONG, 2015);
- materiais que simulam plásticos industriais, como ABS (GREND, 2009; CHUA; LEONG, 2015);
- possibilidade de obter peças de grandes dimensões (existe equipamento com cuba de 1500 x 750 x 550 mm) (CHUA; LEONG, 2015; HALLGRIMSSOM, 2012).
- pode obter objetos de tamanho de micrômetros (HAUSMAN; HORNE, 2014).

As principais limitações desse processo são:

- necessidade de estruturas de suporte para regiões do objeto que não são apoiadas na plataforma, que são feitas do mesmo material do modelo (GREND, 2009; HALLGRIMSSOM, 2012; VOLPATO, 2007; CHUA; LEONG, 2015);
- necessidade de pós-cura, em alguns casos (GREND, 2009; VOLPATO, 2007; CHUA; LEONG, 2015);
- necessita de pós-processamento (remoção do suporte) (VOLPATO, 2007; (GREND, 2009; CHUA; LEONG, 2015);
- pouca variedade de materiais, limitados a resinas poliméricas (HAUSMAN; HORNE, 2014; VOLPATO, 2007);
- a resina é agressiva ao operador (VOLPATO, 2007);
- custo de operação elevado em razão da necessidade de preencher a cuba totalmente para iniciar o processo (GREND, 2009);
- a resina que sobra sofre contaminações e não pode ser reutilizada indefinidamente; a resina reutilizada também compromete a qualidade da peça, segundo depoimentos de usuários;
- a resina fotossensível curada tende a sofrer deformações quando exposta a modesta elevação de temperatura (HALLGRIMSSOM, 2012).

A queda da patente desse processo, que veio a ocorrer em 2014, levou a novas pesquisas, que resultaram em aperfeiçoamentos, principalmente em relação à configuração da máquina na qual a luz é fornecida por baixo da peça que vai sendo construída, resultando na necessidade de uma quantidade bem menor de resina para viabilizar o processo (exemplo na seção 4.2.).

Existem variações desse processo que utilizam uma tela de cristal líquido ou dispositivo de espelhos deformáveis para expor cada camada de uma só vez, o que torna o processo bem mais rápido (GREND, 2009).

Alguns fabricantes têm conseguido tornar o processo rápido o suficiente para que a produção do objeto seja contínua, sem que seja necessária a interrupção entre cada camada para distribuir a resina, praticamente eliminando o efeito escada.

2) Fusão em leito de pó (“*powder bed fusion*”)

Existe uma variedade de processos que utilizam este princípio, sendo que alguns deles utilizam sinterização, em vez de fusão.

Sinterização é um processo semelhante à fusão, em que a matéria-prima não chega a mudar totalmente de fase (sólido-líquido), permanecendo em condição gelatinosa (“temperatura de transição vítrea”), na qual ocorre a união entre as partículas de pó, o que é vantajoso em relação à fusão, porque evita fluxos de material líquido durante o processo (CHUA; LEONG, 2015).

Os principais processos que utilizam este princípio são: sinterização seletiva a laser (SLS e DMLS), fusão seletiva a laser (SLM) e fusão por feixe de elétrons (EBM).

Os processos baseados em sinterização podem obter peças plásticas, cerâmicas ou em metal, e os processos baseados em fusão são utilizados para obter principalmente peças em metal. O detalhamento a seguir refere-se ao processo SLS, mas os demais são bastante semelhantes.

Figura 85 - Ilustração esquemática do processo de Sinterização Seletiva a Laser (SLS).
Fonte: Grenda, 2009, p.12.

Figura 86 - Peça obtida pelo equipamento SLS sPro 230, da 3D Systems.
Fonte: website do fabricante, acessado em agosto de 2015.

O processo SLS é semelhante à estereolitografia, mas neste caso o feixe de laser é traçado sobre a superfície de um pó fortemente compactado. Dois pistões realizam movimentos opostos: enquanto o pistão do sistema de fornecimento eleva-se à altura de uma camada, expondo a quantidade de pó necessária, o pistão da câmara de construção do objeto move-se para baixo na mesma distância para receber o pó, que é transferido por um rolo (GREND, 2009).

O pó a ser fornecido é mantido aquecido a uma temperatura pouco abaixo da temperatura de fusão, assim o laser precisa fornecer pouca energia para gerar a sinterização, ou fusão, o que acelera bastante o processo. É necessária atmosfera controlada no interior da máquina para evitar risco de explosão (VOLPATO, 2007).

Após o objeto estar completamente formado, o pistão é elevado, e o excesso de pó é simplesmente afastado. Mas pode levar um tempo considerável para a peça esfriar e poder ser retirada da máquina, em alguns casos até dois dias (GREND, 2009).

As principais vantagens deste processo são:

- não necessita de estruturas de suporte (ibid.);
- variedade de materiais: teoricamente qualquer material que possa ser transformado em pó pode ser utilizado (CHUA; LEONG, 2015; HALLGRIMSSON, 2012);
- pode obter peças com elevada resistência mecânica, segundo o que foi apurado com fabricantes e usuários;
- não necessita de pós-cura. Existe a possibilidade de sinterizar metal com polímero simultaneamente. Neste caso, a peça precisa ser levada a um forno de alta temperatura para sinterização final do metal (GREND, 2009; VOLPATO, 2007);
- produtividade elevada: o volume da câmara de construção pode ser totalmente ocupado por peças empilhadas e processadas de uma só vez (VOLPATO, 2007);
- exige pouco pós-processamento (dependo da matéria e da aplicação) (ibid.);
- o mesmo equipamento pode processar polímeros, cerâmicas e metais (ibid.);
- o pó que não é sinterizado (ou fundido) é reutilizável (HALLGRIMSSON, 2012).

As principais desvantagens desse processo são:

- acabamento superficial não é bom (GREND, 2009; CHUA; LEONG, 2015);
- custo elevado do equipamento (está entre os mais caros) (VOLPATO, 2007);
- utiliza laser de média potência, o que acarreta consumo elevado de energia (CHUA; LEONG, 2015) e também custo de manutenção elevado (GREND, 2009);
- objetos sinterizados apresentam poros e, dependendo da aplicação, necessitam de infiltração com outros materiais (ibid.);
- foi observado que é necessário esperar que o volume processado esfrie para que as peças sejam retiradas, o que pode demorar até dois dias.

3) Extrusão de material (“*material extrusion*”)

O principal processo baseado em extrusão é a Modelagem por Fusão e Deposição (*Fused Deposition Modeling – FDM*), que será detalhado a seguir.

Figura 87 - Ilustração esquemática do processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM).
Fonte: Grenda, 2009, p.14.

Figura 88 - Peça obtida pelo equipamento FDM Dimension Elite, da Stratasys.
Fonte: website do fabricante, acessado em agosto de 2015.

O processo utiliza como matéria-prima um filamento de termoplástico que é desenrolado de uma bobina e fornecido a um bico de extrusão. O bocal é aquecido para derreter o plástico e possui um mecanismo que permite controlar o fluxo. O bocal é montado sobre um sistema mecânico que permite movimentos coordenados

nas direções X e Y, e o depósito se dá sobre uma plataforma que se desloca na direção Z.

Este tem sido o processo de modelagem tridimensional por física computadorizada por adição mais utilizado, sendo empregado em equipamentos que variam desde muito simples até extremamente complexos, conforme está detalhado na seção 4.2.

Nos equipamentos mais sofisticados, o sistema inteiro está contido dentro de uma câmara, que é mantida a uma temperatura pouco inferior à de fusão, de forma que é necessário fornecer apenas uma pequena quantidade de energia térmica durante a deposição. Isso proporciona controle muito melhor do processo e permite utilizar materiais com ponto de fusão mais elevado.

São necessárias estruturas de suporte que podem ser obtidas por um segundo cabeçote, que fornece um tipo de material solúvel em solução aquosa. Nos casos de equipamentos mais simples, o suporte é feito do mesmo material do modelo e depois destacado.

As principais vantagens desse processo são:

- simplicidade do processo que pode ser utilizado em equipamentos feitos em casa;
- existe grande variedade de materiais que podem ser utilizados, incluindo ABS e outros plásticos de engenharia que proporcionam objetos muito robustos, (GREND, 2009; HALLGRIMSSON, 2012), mas a maioria deles exige equipamentos de maior complexidade tecnológica;
- o processo é bastante amigável, e existe uma variedade de equipamentos que podem ser utilizados em ambiente de escritório (VOLPATO, 2007);
- não utiliza laser, o que reduz o custo de operação e manutenção (VOLPATO, 2007);
- desperdício mínimo de material (CHUA; LEONG, 2015);
- possibilidade de utilizar material de suporte solúvel em solução aquosa, o que torna o processo de remoção muito simples (HALLGRIMSSON, 2012).

As principais desvantagens desse processo são:

- necessita de estruturas de suporte (GREND, 2009; VOLPATO, 2007);

- necessita de pós-processamento para a remoção do suporte (GREND, 2009);
- o acabamento pode ser elevado em equipamentos de qualidade superior, mas não se compara à estereolitografia (ibid.);
- podem ocorrer deformações imprevisíveis à medida que a peça esfria (CHUA; LEONG, 2015);
- baixa produtividade: a velocidade do processo é lenta e limitada pelo fluxo de material no cabeçote de extrusão e por um único bico, que é utilizado para preencher toda a camada (VOLPATO, 2007; CHUA; LEONG, 2015).

Fatores como precisão, acabamento, efeito escada e resistência mecânica variam muito entre os diversos equipamentos que utilizam esse processo. A qualidade das peças pode ser muito elevada nos equipamentos “*high end*”, além de obter peças de grandes dimensões (no caso do equipamento Fortus 900mc, da Stratasys, o envelope de construção é de 914 x 610 x 914 mm).

4) Laminação em folhas (“*sheet lamination*”)

O processo que utiliza este princípio é denominado “Manufatura Laminar de Objetos” (*Laminated Object Manufacturing – LOM*), detalhado a seguir.

Figura 89 - Ilustração esquemática do processo de Manufatura Laminar de objetos (LOM).
Fonte: Grenda, 2009, p.17.

Figura 90 - Processo de remoção do material excedente de uma peça obtida por equipamento LOM da Cubic Technologies. Fonte: website do fabricante, acessado em agosto de 2015.

Neste processo, secções transversais do objeto são recortadas em papel por laser e unidas à secção anterior por um adesivo ativado termicamente por um rolo aquecido. O papel é fornecido por uma bobina, e a sobra é recolhida por outro rolo. As áreas da secção transversal que devem ser removidas ao final são fortemente tracejadas pelo laser para facilitar a remoção, mas pode ser demorado remover o material excedente em algumas geometrias (GREND, 2009). Existem variações desse método que utilizam faca, em vez de laser, e outras matérias-primas como plásticos.

As principais vantagens desse processo são:

- rapidez: o laser não precisa varrer toda a superfície da secção transversal; apenas o perímetro deve ser recortado, o que torna esse processo bem mais rápido que outros que utilizam laser (CHUA; LEONG, 2015);
- os objetos têm a aparência e a textura de madeira e podem ser trabalhados e acabados da mesma maneira (GREND, 2009);
- não requer pós-cura (VOLPATO, 2007; CHUA; LEONG, 2015);
- boa precisão (CHUA; LEONG, 2015);
- não necessita de estruturas de suporte (GREND, 2009; CHUA; LEONG, 2015);
- utiliza matéria-prima de baixo custo;
- foram encontrados exemplos de peças totalmente coloridas obtidas por este processo.

As principais desvantagens desse processo são:

- poucos materiais disponíveis (VOLPATO, 2007);
- acabamento (“*finish*”) não é tão bom como em outros métodos (GREND, 2009);
- dificuldade de obter paredes finas (CHUA; LEONG, 2015);

- a remoção dos excessos de material, usando ferramentas de marcenaria (formões, espátulas entre outras), é bastante trabalhosa, exige habilidades manuais e consome muito tempo (ibid.).
- baixa resolução no eixo Z, porque a espessura da camada não pode ser inferior à espessura do material mais o adesivo (HAUSMAN; HORNE, 2014).

5) Jateamento de material (“*material jetting*”)

Destacam-se dois processos que utilizam este princípio: um que se baseia em mudança de fase, e outro que utiliza fotopolímeros.

Processos baseados em alteração térmica de fase (Thermojet)

Figura 91 - Ilustração esquemática do processo Thermojet da Solidscape Inc.
Fonte: Grenda, 2009, p.15.

O processo Thermojet da Solidscape, que atualmente pertence à Stratasys, utiliza o material de modelo e de suporte em estado líquido (fundido) mantido em um reservatório aquecido. O material é jateado por cabeçote tipo “*inkjet*”, do mesmo tipo utilizado em impressoras bidimensionais. Ao entrar em contato com a plataforma ou com a camada anterior, o material solidifica-se rapidamente (GREND, 2009).

Figura 92 - Peça obtida pelo equipamento Thermojet da Solidscape.
Fonte: website do fabricante, acessado em agosto de 2015.

Uma fresa é utilizada para remover excessos e nivelar a camada depositada, o que torna a precisão dimensional da peça muito boa.

Após o jateamento de cada camada, os bicos ejetores são verificados para identificar entupimentos. Se uma obstrução é detectada, um ciclo de limpeza é realizado, a camada depositada é retirada pela fresa, e repete-se o processo (ibid.).

As estruturas de suporte são depositadas por outro cabeçote, que utiliza um tipo de cera com ponto de fusão inferior ao do material de modelo. Para remoção, eles podem ser fundidos ou dissolvidos quimicamente em uma operação que não envolve trabalho manual (ibid.).

Segundo o que foi apurado junto ao fabricante, as matérias-primas são direcionadas para processos de fundição, e esse tipo de equipamento é amplamente utilizado em joalheria.

As principais vantagens desse processo são:

- precisão: é um dos processos mais precisos disponibilizados atualmente (VOLPATO, 2007; CHUA; LEONG, 2015);
- excelente acabamento (GRENDAL, 2009);

- processo adequado para ser utilizado em ambiente de escritório, tendo em vista que o processo é simples, limpo, eficiente e de fácil operação, não necessita de instalações especiais e os materiais utilizados não são tóxicos (CHUA; LEONG, 2015);
- exige pouco pós-processamento e a retirada do suporte ocorre sem operações manuais (VOLPATO, 2007).

As principais desvantagens desse processo são:

- limitação de materiais, uma vez que é necessário utilizar materiais proprietários formulados especificamente para esse fim (ibid.).
- é um processo consideravelmente lento, quando comparado a outros processos aditivos (CHUA; LEONG, 2015).

Processos baseados em jateamento de fotopolímeros

Figura 93 - Ilustração esquemática do processo Polyjet.
Fonte: Grenda, 2009, p.16.

Neste caso, o processo é similar ao jateamento de material fundido, mas utiliza uma resina fotossensível tanto para material de modelo como para material de suporte, que é curada por uma lâmpada ultravioleta instalada no cabeçote de impressão.

Suas especificações são similares às dos sistemas de estereolitografia, com custo inferior e com muitas conveniências operacionais de uma impressora de baixo custo (GREND, 2009).

Figura 94 - Peças com diversas cores e diversos materiais obtidas pelo equipamento Objet 260 Connex 3, da Stratasys.
Fonte: website do fabricante, acessado em agosto de 2015.

Os processos “*Polyjet*”, da Stratasys, e “*Muiltijet Modeling*” (MJM), da 3D Systems, baseiam-se neste princípio.

Alguns equipamentos utilizam centenas de bicos de jateamento alinhados ao longo de uma haste que se desloca lateralmente e são acionados individualmente em posições definidas pelo modelo matemático. Essa característica torna a produtividade do equipamento muito elevada, já que o tempo necessário para processar o envelope de construção totalmente ocupado é ligeiramente superior ao tempo necessário para produzir uma peça pequena.

Alguns equipamentos que utilizam este princípio conseguem depositar mais de um material simultaneamente, assim como combinações de dois ou mais materiais, resultando em uma grande variedade de possibilidades.

As principais vantagens desse processo são:

- excelente precisão e acabamento superficial em razão de depositar camadas extremamente finas, da ordem de 16 micrômetros, em alguns casos, o que reduz enormemente operações de pós-processamento e acabamento, tornando-as frequentemente desnecessárias (GREENDA, 2009; VOLPATO, 2007);
- não requer pós-cura (VOLPATO, 2007);
- não utiliza laser (ibid.);

- alta produtividade;
- possibilidade de depositar vários materiais ao mesmo tempo (HAUSMAN; HORNE, 2014);
- possibilidade de obter peças totalmente coloridas;
- operação bastante amigável, processo limpo e seguro, adequado a ambiente de escritório (CHUA; LEONG, 2015).

As principais desvantagens desse processo são:

- necessita de suporte (VOLPATO, 2007);
- necessita de pós-processamento para remoção de suporte (CHUA; LEONG, 2015);
- os materiais estão restritos às resinas poliméricas de base acrílica (VOLPATO, 2007), ainda que atualmente exista grande variedade;
- assim como foi observado em relação à estereolitografia, a resina fotossensível curada tende a sofrer deformações quando exposta a modesta elevação de temperatura (HALLGRIMSSOM, 2012).

6) Jateamento de aglutinante (“*binder jetting*”)

Este princípio é utilizado por vários fabricantes de equipamentos para obter peças a partir de diversas matérias-primas em estado de pó (metais, polímeros, amido, gesso, entre outros). A descrição a seguir refere-se ao processo CJP (“*Color Jet Printing*”), que é o mais difundido.

O processo que atualmente recebe a denominação de CJP foi desenvolvido inicialmente pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT) e licenciado pela Z Corporations em 1993, constituindo a base tecnológica dos equipamentos comercializados pela empresa. Inicialmente, era chamado de 3DP (“*Three-Dimensional Printing*”) até a empresa ser adquirida pela 3D Systems, em 2013, que adotou a denominação atual (CHUA; LEONG, 2015).

CJP é muito similar à sinterização seletiva a laser (SLS), com a diferença de que, neste caso, o laser é substituído por um cabeçote tipo “*ink jet*”, similar ao de impressoras a jato de tinta, que deposita um composto adesivo líquido sobre a

camada superior de um leito de pó. O mecanismo de fornecimento de pó é igual ao do processo SLS (GREND, 2009).

Após a conclusão, a plataforma de construção é elevada, e o pó excedente é afastado, deixando o objeto “verde”. As peças devem ser infiltradas com um endurecedor antes que possam ser manuseadas sem riscos de danificá-las.

Figura 95 - Ilustração esquemática do processo CJP.
Fonte: Grenda, 2009, p.13.

Figura 96 - Peça obtida pelo equipamento CJP, da 3D Systems.
Fonte: website do fabricante, acessado em agosto de 2015.

Em equipamentos que processam metal e vidro, as peças obtidas inicialmente necessitam ser levadas a fornos em alta temperatura para fundir o aglutinante e o pó ou devem ser infiltradas com outros metais em estado líquido, como, por exemplo, bronze (HAUSMAN; HORNE, 2014).

As principais vantagens desse processo são:

- não necessita de estruturas de suporte (VOLPATO, 2007);
- não utiliza laser (ibid.);
- desperdício de material tende a zero, uma vez que todo o pó não aglutinado pode ser reutilizado (VOLPATO, 2007; CHUA; LEONG, 2015);
- é um processo consideravelmente rápido (GRENDAL 2009; VOLPATO, 2007);
- pode utilizar matérias-primas extremamente baratas, como gesso e amido;
- alguns equipamentos podem obter peças totalmente coloridas (“*fullcolor*”) (GRENDAL 2009; VOLPATO, 2007).

As principais desvantagens desse processo são:

- pouca variedade de materiais (VOLPATO, 2007);
- necessita de pós-processamento (VOLPATO, 2007; CHUA; LEONG, 2015; GRENDAL 2009);
- acabamento superficial deficiente (VOLPATO, 2007; CHUA; LEONG, 2015);
- obtém peças pouco funcionais (VOLPATO, 2007; CHUA; LEONG, 2015).

7) Deposição com energia direcionada (“*directed energy deposition*”)

O processo que utiliza este princípio é denominado de “Fabricação da Forma Final a Laser” (“*Laser Powder Forming*” – LPF).

Um laser de alta potência é utilizado para fundir o pó metálico fornecido coaxialmente em relação com o foco do feixe de laser através de uma cabeça de deposição. O feixe de laser normalmente atravessa o centro da cabeça e é direcionado para um pequeno ponto, por uma ou mais lentes. A mesa é movida nas direções X e Y, de forma a rastrear cada camada do objeto. Tipicamente, a cabeça é movida para cima verticalmente à medida que cada camada é concluída (GRENDAL 2009).

Figura 97 - Ilustração esquemática do processo Lens da Optomec.
Fonte: Grenda, 2009, p.18.

Figura 98 - Componente de turbina produzido pelo processo LPF da Optomec.
Fonte: website do fabricante, acessado em agosto de 2015.

Esse processo é particularmente útil para processar metais que requerem níveis excepcionalmente elevados de calor para fundir (HAUSMAN; HORNE, 2014).

A força dessa tecnologia está na possibilidade de fabricar peças de metal totalmente densas, com boas propriedades metalúrgicas e em velocidade razoável (GREND, 2009).

Uma variedade de metais pode ser usada, como aço inoxidável, cobre, alumínio, entre outros.

Figura 99 - Peças em titânio produzidas pelo processo LPF da Optomec.
Fonte: website do fabricante, acessado em agosto de 2015.

REFERÊNCIAS¹

ALEXANDRE, C. A. I. **Modelos físicos aplicados ao desenho industrial**. São Paulo, 1992. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.

ANDRADE, J. M. **Os elementos tridimensionais de representação como instrumental básico e suas aplicações no desenvolvimento de projetos de desenho industrial**. São Paulo, 1988. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.

BAXTER, M. **Projeto do produto**: guia prático para o desenvolvimento de novos produtos. 2ª edição. São Paulo: Edgard Blucher, 2000.

BJORN LUND, L. *et al.* **Design secrets: products**: 50 real-life projects uncovered – IDSA. Rockport: Gloucester, 2001.

BOOKS NIPPAN STAFF (org.) **Industrial design workshop**: the creative process behind product design. Tóquio: Books Nippan, 1993.

BONSIEPE, G. **Teoria y practica del diseno industrial**: elementos para uma manualística crítica. Barcelona: Gustavo Gili, 1978.

_____. **Metodologia experimental**. Brasília: CNPq, 1984.

_____. **Design como prática de projeto**. São Paulo: Blucher, 2012.

BURDEK, B. E. **História, teoria e prática do design de produtos**. São Paulo: Blucher, 2006.

CROSS, N. **Engineering design methods**: strategies for product design. Fourth edition. New Jersey: John Wiley, 2008.

ECHENIQUE, M. **Modelos matemáticos de la estructura espacial urbana, aplicaciones en América Latina**. Buenos Aires: Nueva Visión, 1975.

GREND, E. **Printing the future**: the 3D printing and prototyping source book. Third edition. Arlington: Castle Island Co, 2009.

GRIMM, T. **Rapid prototyping benchmark: 3d printers**. T.A. Grimm & Associates, 2013. Disponível em: www.tagrimm.com/benchmark

HALLGRIMSSON, B. **Prototyping and modelmaking for product design**. London: Laurence King, 2012.

HAUSMAN, K.K., HORNE, R. **3d printing for dummies**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

HESKETT, J. **Desenho industrial**. 3ª edição. São Paulo: José Olimpo, 2006.

IRONS, I. **Learn CNC secrets**. La Vergne: Lightning Source, 2007.

JONES, C. **Métodos de diseño**. Barcelona: Gustavo Gili, 1970.

KAI CHUA, C.; FAI LEONG, K. **3D printing and additive manufacturing**: principles and applications. Fourth edition. Singapore: World Scientific, 2015.

LOBACH, B. **Design industrial**: bases para a configuração dos produtos industriais. São Paulo: Blucher, 2007.

MILTON, A.; RODGERS, P. **Research methods for product design**. London: Laurence King, 2013.

MUNARI, B. **Das coisas nascem coisas**. 2ª edição. São Paulo: Martins Fontes, 2008.

NANFARA, F.; UCCELO, T.; MURPHY, D. **The CNC workbook**: an introduction to computer numerical control. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1995.

OVERBY, A. **CNC machining handbook**. New York: Mac Gram Hil, 2011.

STEPHAN, A. P. **10 cases do design brasileiro**: os bastidores do processo de criação. São Paulo: Blucher, 2010.

STERNBERG, J. S. **Psicologia cognitiva**. 5ª edição. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. **Product design and development**. Fifth edition. New York: McGraw-Hill, 2012.

VOLPATO, N. (org.). **Prototipagem rápida**: tecnologias e aplicações. São Paulo: Edgard Blucher, 2007.

Websites:

3D Systems:

<http://www.3dsystems.com>

Aviso:

<http://www.avisobr.com>

B9 Creator:

<https://www.b9c.com>

Carbon 3D

<http://carbon3d.com>

Cubic Technologies

<http://www.cubicttechnologies.com>

EOS:

<http://www.eos.info>

Facebook

<https://www.facebook.com/groups/impressora3d>

Fiat Mio:

<http://www.fiatmio.cc>

Formlabs:

<https://formlabs.com>

GTmax:

<http://www.gtmax3d.com.br>

ISO/ASTM:

<http://www.iso.org>

Nonoscribe:

<http://www.nanoscribe.de>

Optomec:

<https://www.optomec.com>

Pensando o design automotivo:

<http://www.fau.usp.br/intermeios/pagina.php?id=267>

Robtec:

<http://www.robtec.com>

http://www.robtec.com/images/pdf/case_cenpra.pdf

Roland:

<http://www.rolanddg.com.br>

Romi:

<http://www.romi.com>

Shapeways:

<http://www.shapeways.com>

SolidScape:

<http://www.solid-scape.com>

Stratasys:

<http://www.stratasys.com>

Ultimaker:

<https://ultimaker.com>

Voolt 3D:

<http://www.voolt3d.com.br>

Wikipédia:

https://en.wikipedia.org/wiki/3D_Systems

<https://en.wikipedia.org/wiki/Stratasys>

<https://pt.wikipedia.org/wiki/Fotônica>

YouTube:

<https://www.youtube.com/watch?v=3hoiOcFtllo>

<https://www.youtube.com/watch?v=UksOU1J0AIM>

Outros:

<http://faz-voce-mesmo.blogspot.com.br>

<https://boaimpresao3d.com.br>

<http://www.jbenett.co.uk>

Escolas e institutos de pesquisa visitados:

Laboratório de Modelos e Ensaio (LAME) da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU USP).

Universidade Presbiteriana Mackenzie - São Paulo - SP.

Centro Universitário Senac - São Paulo - SP.

Escola Senai “Mario Amato” - São Bernardo do Campo - SP.

Centro de Tecnologia da Informação - CTI Renato Archer - Campinas - SP.

Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção (LAPAC) Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Pontifícia Universidade Católica - Rio de Janeiro - RJ.

Escola Superior de Desenho Industrial (ESDI) - Rio de Janeiro - RJ.

Instituto Nacional de Tecnologia (INT) - Rio de Janeiro - RJ.

Estágio

Foi realizado estágio supervisionado em docência pelo programa PAE (Programa de Aperfeiçoamento do Ensino), durante o primeiro semestre de 2013, junto à disciplina Projeto de Produto III, do curso de design da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.