

UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

REGIANE TREVISAN PUPO

Inserção da PROTOTIPAGEM e FABRICAÇÃO DIGITAIS no
processo de projeto: um novo desafio
para o ensino de arquitetura

**Campinas, SP
2009**

Regiane Trevisan Pupo

Inserção da PROTOTIPAGEM e FABRICAÇÃO DIGITAIS no
processo de projeto: um novo desafio
para o ensino de arquitetura

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Arquitetura e Construção.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani

Campinas, SP

2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

P969i Pupo, Regiane Trevisan
A inserção da prototipagem e fabricação digitais
no processo de projeto: um novo desafio para o
ensino da arquitetura / Regiane Trevisan Pupo. --
Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Maria Gabriela Caffarena Celani.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil,
Arquitetura e Urbanismo.

1. Prototipagem rápida. 2. Maquetes. 3.
Arquitetura e tecnologia. I. Celani, Maria Gabriela
Caffarena. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: The insertion of digital prototyping and fabrication in the
design process: a new challenge for architecture learning

Palavras-chave em Inglês: Rapid prototyping, Maquetes, Technology and
architecture

Área de concentração: Arquitetura e Construção

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora: José Manuel Pinto Duarte, Regina Coeli Ruschel,
Daniel de Carvalho Moreira, Jorge Vicente Lopes da
Silva

Data da defesa: 29/01/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

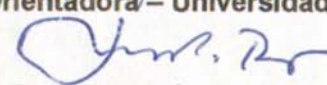
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

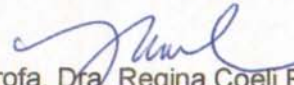
Inserção da PROTOTIPAGEM e FABRICAÇÃO DIGITAIS no processo de projeto:
um novo desafio para o ensino de arquitetura

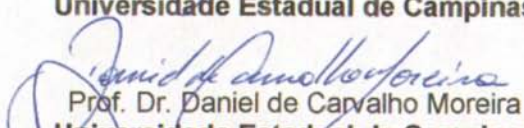
REGIANE TREVISAN PUPO

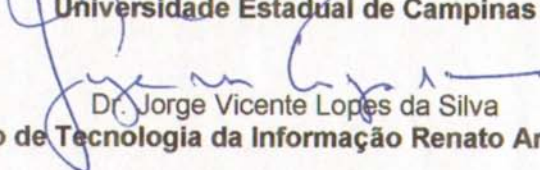
Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:


Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani
Presidente e Orientadora – Universidade Estadual de Campinas


Prof. Dr. José Manuel Pinto Duarte
Universidade Técnica de Lisboa


Profa. Dra. Regina Coeli Ruschel
Universidade Estadual de Campinas


Prof. Dr. Daniel de Carvalho Moreira
Universidade Estadual de Campinas


Dr. Jorge Vicente Lopes da Silva
Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI)

Campinas, 29 de janeiro de 2009

O valor das coisas não está no tempo em que elas duram,
mas na intensidade com que acontecem.
Por isso existem momentos inesquecíveis,
coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis
(Fernando Pessoa)

Dedico este trabalho à “*Pupo Gang*”,
pela existência e presença.

AGRADECIMENTOS

À orientação da professora Gabriela Celani pela amizade, incentivo, apoio, dedicação e eterna vontade de aprender mais.

Aos professores da Pós-Graduação da FEC pela confiança e ensinamentos repassados.

Ao professor José Pinto Duarte do Instituto Superior Técnico de Lisboa.

À FAPESP pelo apoio e pela concessão de bolsa de estudos no exterior para a continuidade deste doutorado.

RESUMO

PUPO, Regiane Trevisan. **A inserção da PROTOTIPAGEM E FABRICAÇÃO DIGITAIS no processo de projeto: um novo desafio para o ensino de arquitetura.** Campinas, 2008. 237f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.

Nos últimos dez anos as novas tecnologias digitais e os processos de produção pós-industriais têm se firmado como grandes aliados do processo de projeto arquitetônico, da fabricação de componentes e da construção do espaço construído. Esta pesquisa analisa as inovações recentes na área de informática aplicada à arquitetura, tendo em vista sua incorporação no processo de projeto e na formação do arquiteto. Em especial, discute a importância da inserção de prototipagem e fabricação digitais no currículo de arquitetura, de maneira integrada às disciplinas de projeto e demais matérias da grade curricular. O trabalho teve início com um levantamento de teses desenvolvidas nos últimos anos na área de informática aplicada à arquitetura, na qual se constatou uma grande diferença de foco entre os trabalhos desenvolvidos no Brasil e no exterior. A partir dessa constatação, foram desenvolvidos experimentos pedagógicos no curso de Arquitetura e Urbanismo da FEC, na UNICAMP, com o objetivo de introduzir conceitos sobre as tecnologias de prototipagem e fabricação digitais e seu uso no processo de projeto. A partir dos resultados obtidos, foi desenvolvida uma proposta de inserção dessas novas tecnologias no curso analisado em particular, e nos demais cursos de arquitetura brasileiros em geral, de maneira integrada às demais disciplinas do currículo. Espera-se que os resultados obtidos nesta pesquisa contribuam para a inserção dessas tecnologias na formação do arquiteto no Brasil, e conseqüentemente para uma evolução da arquitetura brasileira, com a incorporação dos novos métodos de produção pós-industriais.

Palavras-chave: Fabricação digital, prototipagem rápida, ensino de projeto, grade curricular, maquete.

ABSTRACT

PUPO, Regiane Trevisan. **The insertion of DIGITAL PROTOTYPING AND FABRICATION in the design process: a new challenge for architecture learning** Campinas, 2008. 237 f. Theses (Doctorate in Civil Engineering) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.

During the past 10 years the new digital technologies and the post-industrial production have been incorporated to the design process, to the production of building parts, and to the construction of buildings. The present research analyzes the recent innovations in the area of technologies applied to architecture, aiming at its incorporation into the design process as well as in architectural education. It discusses the importance of the insertion of digital prototyping and fabrication in the architecture curriculum, in such a way that it promotes the integration between the design studio and the other subjects in the curriculum. The work began with a survey of recent theses and dissertations about technology applied to architecture. The survey showed that there is still a great difference between the works developed in Brazil and abroad. Next, some pedagogical experiments were developed at FEC, aiming at the introduction of digital prototyping and fabrication in the design process. A proposal of insertion of these new technologies in architecture courses was then developed. The results obtained in this research are expected to contribute to the insertion of these technologies in the architectural education in Brazil, hopefully leading to an evolution of brazilian architecture with the use of new post industrial production methods.

Key-words: Digital fabrication, rapid prototyping, design learning process, curriculum, scale-model.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Maquetes produzidas com PR, Foster & Partners	3
Figura 1.2: Campos de utilização Prototipagem Digital/Fabricação Digital	9
Figura 1.3: Esquema da estrutura da tese	12
Figura 2.1: Maquete do “Forum for Furniture, Art and Culture”, Frank Gehry	15
Figura 2.2: Pavilhão BMW, Bernhard Franken	15
Figura 2.3: Projeto para o concurso do museu Kunsthaus, Graz, Áustria, 2002- 2003 Arq. Peter Cook	15
Figura 2.4: Estrutura de relações entre as técnicas digitais e tradicionais para arquitetura e construção	17
Figura 2.5: Diferenciação entre técnicas já consolidadas e em desenvolvimento ..	18
Figura 2.6: Técnicas discutidas e testadas nesta tese	19
Figura 2.7: Interface de projeto on-line	21
Figura 2.8: Montagem prévia das peças em CNC	21
Figura 2.9: Métodos de digitalização automatizada	24
Figura 2.10: Os quatro tipos principais de métodos de não contato	25
Figura 2.11: Uso de braço articulado para a digitalização 3D	27
Figura 2.12: Método de digitalização por contato de plataforma	28
Figura 2.13: Métodos de produção automatizada para arquitetura e construção ...	30
Figura 2.14: Método de produção automatizada para Arquitetura e Construção por finalidade	31
Figura 2.15: Estudo de túnel de vento com protótipo executado na impressora 3D	32
Figura 2.16: Maquete de apresentação prototipada	32
Figura 2.17: Protótipo final em CNC do primeiro prêmio Concurso Táxi Stand	33
Figura 2.18: Metalbending no Museu Guggenheim, Bilbao Espanha	34
Figura 2.19: Opções de processo Contour Crafting (KHOSHNEVIS, 2004)	35
Figura 2.20: Processo de construção “Contour Crafting”	35
Figura 2.21: Robô industrial da ETHZ – Departamento de arquitetura	36
Figura 2.22: Telha prototipada e exemplo de aplicação	36

Figura 2.23: Painéis acústicos únicos	37
Figura 2.24: Produção em pequena série para a Igreja Sagrada Família, Barcelona	38
Figura 2.25: Método de produção automatizada para Arquitetura e Construção por número de dimensões	38
Figura 2.26: Uso da cortadora Vinil, DIGITALDESIGNFABRICATION GROUP	39
Figura 2.27: Trabalho em cortadora a laser	39
Figura 2.28: Método de produção em duas dimensões e meia (2.5 D)	40
Figura 2.29: Produção direta 3D, em escala real, em equipamento de cinco eixos	40
Figura 2.30: Produção direta 3D de maquete em equipamento Stratasys Prodigy	40
Figura 2.31: Métodos de produção automatizada para Arquitetura e Construção pela maneira que os objetos são produzidos	41
Figura 2.32: Desbaste de material em uma direção e em vários eixos	42
Figura 2.33: Fresas de 3 a 6 eixos	43
Figura 2.34: Maquete produzida em cortadora laser em MDF e balsa. IST- Instituto Superior Técnico de Lisboa	44
Figura 2.35: Maquete produzida em cortadora laser em papelão ondulado. FEC- Unicamp	44
Figura 2.36: Cortadora a Jato de água com detalhe do nozzle	45
Figura 2.37: Exemplo de objeto de policarbonato cortado com cortadora a jato de água	45
Figura 2.38: Exemplo de objeto metálico cortado com a cortadora a jato de água	45
Figura 2.39: Cortadora Plasma-Arc	45
Figura 2.40: Sistema formativo - Vidro com curvaturas especiais	46
Figura 2.41: Sistema formativo – BMW Pavillion, B. Franken	47
Figura 2.42: Etapas gerais do processo de Prototipagem Rápida	54
Figura 2.43: Limites dimensionais atuais e futuros da prototipagem rápida	56
Figura 2.44: Processo FDM - <i>Fused Deposition Modeling</i> (Modelagem por Fusão e Deposição)	60
Figura 2.45: Preparação de equipamento Stratasys Prodigy Plus	61
Figura 2.46: Interface <i>software</i> INSIGHT para equipamento Stratasys Prodigy.....	62
Figura 2.47: Retirada do material de suporte manualmente	63
Figura 2.48: Peça construída em um único bloco com remoção de material de suporte por ultra-som	63
Figura 2.49: Retirada de material de suporte por imersão e ultra-som	64

Figura 2.50: Processo MJM	66
Figura 2.51: Exemplos de peças produzidas pela tecnologia Bench-Top	67
Figura 2.52: Processo BenchTop da SolidScape	68
Figura 2.53: Processo de impressão 3D em tecnologia SLA	70
Figura 2.54: Peças e equipamento SLA.....	70
Figura 2.55: Exemplos de aplicações da tecnologia PolyJet	72
Figura 2.56: Metalização de protótipo em PolyJet	73
Figura 2.57: Equipamento e processo SLS	74
Figura 2.58: Sistema de Sinterização Pro – 3Dsystems	76
Figura 2.59: Impressão 3DP em ZCorp310	78
Figura 2.60: Pós-processamento do sistema 3DP	79
Figura 2.61: Gesso em pó como suporte no processo 3DP	80
Figura 2.62: alguns exemplos de impressão em 3DP	81
Figura 2.63: Processo CAM-LEM	82
Figura 2.64: Cilindro com canais de resfriamento interno – CAD-LEM	83
Figura 2.65: Processo de impressão por camadas EBM	84
Figura 2.66: Processo LOM	86
Figura 2.67: Pós-processamento e peça pronta	87
Figura 2.68: Processos PLT de alimentação em rolo e em folhas unitárias	87
Figura 2.69: Pós-processamento em PLT	88
Figura 2.70: Triângulo no formato STL	92
Figura 2.71: Sólido simples representado por triângulos e seus vetores	92
Figura 2.72: Erros na malha STL gerada	93
Figura 2.73: Redundância de pontos	93
Figura 2.74: Parâmetros de controle da malha	94
Figura 2.75: Comparação entre 3DP e corte a laser	96
Figura 2.76: Interface de impressão da cortadora a laser X-660 Universal Systems	97
Figura 2.77: Experiência com o software Pepakura	99
Figura 2.78: Fresadora Modela Miller com exemplos de aplicação em madeira	100

Figura 2.79: Fresadora Denford Miller com exemplos de aplicação em metal	100
Figura 2.80: Maquete Disney Concert Hall (1998) Frank Ghery	101
Figura 2.81: Maquete Disney Concert Hall (1998) para testes acústicos	101
Figura 2.82: Web of North-Holland	103
Figura 2.83: Projeto Fish Sculpture, Frank Gehry	105
Figura 2.84: Formas livres criadas por Gaudi	106
Figura 2.85: Desenhos e modelo físico da “Endless House” por Frederick Kiesler	106
Figura 2.86: Projeto Der Neue Zollhof (1996-99), Dusseldorf, Alemanha, F. Gehry	108
Figura 2.87: Estudo de um elemento de fachada, Projeto Der Neue Zollhof	109
Figura 2.88: Seqüência de montagem de um painel de fachada, Projeto Der Neue Zollhof	110
Figura 2.89: Processo de fabricação digital - (Frank Gehry, 2000)	110
Figura 2.90: Projeto de interiores produzido com CNC	112
Figura 2.91: Projeto de interiores produzido com CNC – peças sem acabamento	112
Figura 2.92: Projeto Manilow Residence, Garofalo Architects	113
Figura 2.93: Fatiamento de sólidos	114
Figura 2.94: Projeto “Sitscape”, Hackenbroich Arquitetos, Alemanha, 2006	114
Figura 2.95: Projeto Alessi Tea & Coffe Piazza 2000 de Greg Lynn	115
Figura 2.96: Protótipos produzidos em CNC no workshop	116
Figura 2.97: Cadeira produzida com técnicas de fabricação digital e montada manualmente	117
Figura 2.98: CNC Router MultiCam MG200	118
Figura 2.99: Modelo do domus da Igreja de São Pedro construído por Michelangelo em 1558	119
Figura 2.100: Maquete suspensa da Colônia Guell Church (1889-1908) de Antonio Gaudi	120
Figura 2.101: Variação de maquetes na concepção do projeto	122
Figura 2.102: Processo de projeto de Frank Gehry	123
Figura 2.103: Maquete aramada para estudo, Bernhard Franken	124
Figura 2.104: Utilização de protótipos em escala 1:1, Strata Center	125
Figura 2.105: Maquete de projeto de Frank Gehry	126
Figura 2.106: Maquete em papelão	126
Figura 2.107: Exemplo de maquete impressa em 3D	126

Figura 2.108: Três exemplos de detalhes em maquetes	127
Figura 3.1: Estrutura dos próximos capítulos	129
Figura 5.1: Prototipagem para testes em túnel de vento – RWDI	138
Figura 5.2: Uso da fabricação digital na Igreja Sagrada Família, Barcelona	140
Figura 5.3: Edifício Leonhard na Universidade Penn State e sua réplica em LOM	145
Figura 5.4 - Equipamentos do módulo de prototipagem rápida do ISTAR	149
Figura 5.5 - Equipamento do módulo de Realidade Virtual do ISTAR	150
Figura 5.6 - Equipamento do módulo de Colaboração Remota do ISTAR	150
Figura 5.7: Maquete 1º prêmio, Taxi Stand Lisboa	152
Figura 5.8: Maquete Menção honrosa, Taxi Stand, Lisboa	152
Figura 5.9: Impressora 3DP ZCorp 310 e Cortadora a Laser Universal X660	154
Figura 5.10: Maquete da Unicamp confeccionada em laminado (terreno) e SLS (edificações)	156
Figura 5.11: Trelças confeccionadas no processo 3DP – LAPAC e no processo FDM – IST	158
Figura 6.1 : Workshops do LAPAC	163
Figura 6.2: Todos os trabalhos produzidos durante os workshops	164
Figura 6.3: Igreja em Atlântida, Uruguai, Eng. Eladio Dieste	165
Figura 6.4: Peça prototipada em gesso – ZCorp 310	165
Figura 6.5: Catedral de Brasília, Arquiteto Oscar Niemeyer	165
Figura 6.6: Peça prototipada em gesso – ZCorp 310	165
Figura 6.7: impressão 3D - Museu Guggenheim NY	168
Figura 6.8: Corte a laser e montagem - Campus da UFMT	168
Figura 6.9: Tela de apresentação do programa Skype	169
Figura 6.10: Tela mostrando a comunicação online, em tempo real entre o LAPAC e o SENAC	169
Figura 6.11: Trabalhos modelados durante o Workshop e prototipados no LAPAC-Unicamp	170
Figura 6.12: Exposição dos trabalhos no evento P&D após o workshop	170
Figura 6.13: Diversidade de materiais utilizados na cortadora a laser para a elaboração das maquetes de TFG	172
Figura 6.14: Maquete inicial do trabalho de Luis Fernando Milan no primeiro semestre 2008	173
Figura 6.15: Maquete da entrega final do trabalho de Luis Fernando Milan em dezembro 2008	174

Figura 6.16: Maquetes da entrega inicial (a e b) e final (c e d) do trabalho de Mariana Ramos	175
Figura 6.17: Maquete caracterizando acentuada topografia da aluna Maria Julia Mazetto	176
Figura 6.18: Bloco em PU e digitalizado	177
Figura 6.19: Planificação no software Pepakura	178
Figura 6.20: Maquete de apresentação final de Izabela Maciel	178
Figura 7.1: Ligações intrínsecas ao modelo geométrico digital	192
Figura 7.2: Aplicação de textura/imagem em impressões em 3DP	194
Figura 7.3: Proposta de inserção das novas tecnologias na grade curricular de arquitetura	196

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Dois tipos diferentes de representações digitais do mesmo objeto do “mundo real”	23
Tabela 2.2: Processos aditivos analisados nesta pesquisa	59
Tabela 2.3: Resumo das tecnologias apresentadas	89
Tabela 2.4: Máquinas comercializadas das empresas citadas nesta pesquisa	90
Tabela 2.5: Parâmetro de controle dos arquivos da figura 76	94
Tabela 4.1: Categorias dos trabalhos brasileiros	133
Tabela 4.2: Categorias dos trabalhos estrangeiros	134
Tabela 5.1: Grupos de pesquisa de aplicações em prototipagem e fabricação digitais na arquitetura e construção no Brasil	143
Tabela 6.1: Conjunto de variáveis para cada peça prototipada, workshop FEC	166
Tabela 6.2: Conjunto de variáveis para cada peça prototipada, workshop Senac .	170

LISTA DE ABREVIATURAS

3DP	<i>3D Printer</i> (impressão 3D)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana para Testes e Materiais)
BIM	<i>Building Information Modeling</i> (Modelagem de Informação da Construção)
BMP	<i>Bitmap</i> (Arquivo de mapa de bits)
CAD/CAM	<i>Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing</i> (Computador Auxiliando Desenho / Computador Auxiliando a Manufatura)
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> (Computador Auxiliando Engenharia)
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CATIA	<i>Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application</i> (
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CIMJECT	Laboratório de Projeto e Fabricação de Componentes de Plástico Injetado
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i> (Máquina de Medição por Coordenadas)
CNC	<i>Computer Numeric Control</i> (Controle Numérico Computadorizado)
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DOF	<i>Degrees of Freedom</i> (graus de liberdade)
DPI	<i>Dots per inch</i> (pontos por polegada)
DFM	<i>Design for Manufacturing</i> (projeto para a manufatura)
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i> (Sinterização a Laser Direta em Metal)
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i> (Arquivo de Intercâmbio de Arquivos CAD)
EC	Elementos Construtivos
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> (Modelagem por fusão e deposição)
FEC	Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
GIF	<i>Graphics Interchange Format</i> (Formato para Intercâmbio de Gráficos)
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i> (Formato de intercâmbio digital entre programas CAD)

JPG	<i>Joint Photographic Experts Group</i> (Formato de Compressão de Imagens Gráficas)
LAPAC	Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> (Manufatura de objetos laminados)
MDF	<i>Medium Dense Wood Fiber</i> (Fibra de Madeira de Densidade Média)
MIT	<i>Massachussets Institute of Technology</i> (Instituto de Tecnologia de Massachussets)
MJM	<i>MultiJet Modelling</i> (Processo de Modelagem por Jato de tinta)
MRI	<i>Magnetic Ressonance Imaging</i> (Ressonância Magnética por imagem)
NUMA	Núcleo de Manufatura Avançada
NURBS	<i>Non-Uniform Rational B-Splines</i> (Modelo Matemático para Gerar Curvas e Superfícies)
PLT	<i>Printer Control Language</i> (Formato de Arquivo de Impressão de programa CAD)
RFP	<i>Rapid Freeze Prototyping</i> (Prototipagem por Congelamento Rápido)
SLA	<i>Stereolithography Apparatus</i> (Aparato de Estereolitografia)
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> (Sinterização Seletiva a Laser)
STL	<i>Stereolithography</i> (Estereolitografia)
TC	Tomografia computadorizada
TFG	Trabalho Final de Graduação
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	viii
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Problemática	7
1.2. Definições	8
1.3. Objetivos	10
1.4. Hipótese	10
1.5. Estrutura da tese	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1. Meios Digitais para arquitetura	16
2.1.1. Do físico ao digital	22
2.1.2. Do digital ao físico	28
2.2. Prototipagem digital	47
2.2.1. A Prototipagem Rápida	48
2.2.2. Corte a laser	94
2.2.3. <i>Milling</i> - CNC	99
2.3. Fabricação digital	101
2.4. A importância da maquete no processo de projeto	118
3. MATERIAIS E MÉTODOS	128
4. LEVANTAMENTO DE TESES	130
5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E ESTUDOS DE CASO	137
5.1. Exemplos de aplicação na prática profissional	137
5.1.1. Túnel de Vento	137
5.1.2. Sagrada Família	139
5.2. Exemplos de aplicações no ensino	141

5.2.1. No Brasil	141
5.2.2. No exterior	143
5.3. Estudos de caso	147
5.3.1. Implantação do ISTAR	147
5.3.2. Implantação do LAPAC	153
6. EXPERIMENTOS PEDAGÓGICOS	161
6.1. Transferência de tecnologia – <i>workshops</i>	161
6.1.1. <i>Workshops</i> para professores e alunos da FEC	162
6.1.2. <i>Workshops</i> para alunos de outras instituições	167
6.1.3. <i>Workshop</i> em congresso	168
6.2. Acompanhamento dos trabalhos de TFG da FEC após a transferência de tecnologia	171
6.3. Análise e interpretação dos dados	179
7. PROPOSTA	189
7.1. Inserção de Prototipagem e Fabricação Digitais em cursos de arquitetura	191
7.2. Diretrizes para implementação e operacionalização de um laboratório de Prototipagem em um curso de Arquitetura	197
8. CONCLUSÕES	203
REFERÊNCIAS	205
APÊNDICE I : Teses Brasileiras	218
APÊNDICE II : Teses estrangeiras	220
APÊNDICE III : Grupos de Pesquisa CNPq	222
APÊNDICE IV : Universidades estrangeiras com laboratórios de Prototipagem e Fabricação digital para arquitetura	224
APÊNDICE V : Trabalhos de IC produzidos pelo LAPAC	225
APÊNDICE VI : Trabalhos de extensão à comunidade desenvolvidos pelo LAPAC	230
APÊNDICE VII : Pesquisa com alunos do TFG	232
APÊNDICE VIII: Questionário final <i>Workshops</i>	235
APÊNDICE IX : Limitações	237

1. INTRODUÇÃO

*“Now the goal is to use technology
in creative ways to create architecture
designs not possible previously.”*

(William Mitchell)

Não há dúvidas que a tecnologia digital tem alterado a maneira de se produzir arquitetura. Os arquitetos utilizam *software* na criação de formas complexas que contêm inúmeras informações projetuais e ainda utilizam essas informações para a fabricação de maquetes físicas ou diretamente na fabricação de elementos construtivos. O potencial que estas novas tecnologias trazem à produção e ao gerenciamento de projetos tem revolucionado a forma como se produz, avalia, fabrica e constrói arquitetura. Contudo, isso levou a um momento de reavaliação dos mecanismos inerentes a essa utilização desenfreada.

A tecnologia tem historicamente servido como um catalisador de novas idéias na arquitetura (KLINGER, 2007). As novas formas de produção em arquitetura associadas à tecnologia digital, hoje, trabalham como grandes aliadas na inovação de projetos, na fabricação e na construção. Historicamente, desenhos bi-dimensionais foram o meio de comunicação em projetos de arquitetura, engenharia e design industrial por muito tempo. Mesmo assim, não são mais considerados como soluções que possam garantir uma compreensão espacial, tanto na fase conceitual quanto na de representação. A representação tridimensional e o modelo físico proporcionam um maior êxito nessa comunicação, estabelecendo proporcionalidades, perspectivas e funcionalidades inerentes ao projeto, que talvez não pudessem ser evidenciadas em uma representação bi-dimensional. A arquitetura é o tipo de atividade em que a comunicação tem sua importância para o sucesso do projeto, portanto, quanto maior e

melhor a comunicação entre as partes que envolvem o projeto, melhor a qualidade do produto final, muitas vezes reduzindo tempo de execução e custos.

Indiscutivelmente, a indústria automotiva e o design industrial são grandes fontes inspiradoras para o crescimento no uso de novas técnicas de produção também na arquitetura. A relevância que essas áreas têm nas pesquisas e aplicações na arquitetura, hoje, se voltam principalmente para as técnicas de modelagem 3D e para a produção de protótipos rápidos. Pode-se ainda considerar uma influência muito grande de certas técnicas para a produção de elementos construtivos, posteriormente montados na obra. Assim, novos meios de construção produzem novas maneiras de entendimento e geração da forma.

Os arquitetos têm desenvolvido novos “vocabulários” não somente para a produção final dos produtos, mas também para modelos físicos (maquetes), graças a uma variedade de ferramentas e técnicas que têm surgido para completar as tradicionais, potencializando todo o processo de projeto. A prototipagem digital é uma delas. Diversas técnicas para a produção de modelos físicos se utilizam da modelagem 3D, produzida com o avanço de *software* e programas mais interativos e amigáveis, na transformação do desenho visualizado no computador para a maquete física. A prototipagem digital, hoje, utilizada para a arquitetura, é uma grande aliada para uma melhor compreensão espacial do projeto, com tecnologias que se utilizam de matérias-primas como gesso, resinas, plásticos, entre outros, para a confecção de modelos, em prazos mínimos se comparados às técnicas tradicionais.

Escritórios de arquitetura do exterior que adotaram recentemente o uso dessas técnicas, como Foster & Partnes (Inglaterra), Garofalo Architects (Estados Unidos), Gehry Associates (Estados Unidos), Zaha Hadid (Inglaterra), vêm obtendo resultados impressionantes em termos de qualidade e produtividade. A figura 1.1 mostra uma coletânea de maquetes produzidas com técnicas de prototipagem rápida de projetos do

escritório Foster & Partners, que possui equipamentos para uso interno, que são utilizados nas diversas etapas do processo de projeto.



Figura 1.1: Maquetes produzidas com PR no Foster & Partners (Londres)
Fonte: <http://www.arcspace.com/exhibitions/Louisiana/index.htm>

A maioria dos arquitetos já incorporou o CAD (*Computer Aided Design*) como ferramenta de desenho, hoje visto como procedimento comum até mesmo onde muitas vezes não seria necessário. Mas para os profissionais de vanguarda, que com seu extensivo uso já extrapolaram a simples barreira da representação, novas formas de aplicação têm sido exploradas. O CAM (*Computer Aided Manufacturing* – Computador Auxiliando a Manufatura), que vem associado à fabricação digital, converge um maquinário de peso destinado à execução de elementos construtivos para serem encaminhados diretamente à obra.

Esse tipo de equipamento, principalmente as máquinas de controle numérico (CNC - *Computer Numeric Control*), até então de uso quase exclusivo da engenharia mecânica, é hoje amplamente utilizado na arquitetura, como responsável pela produção de fôrmas ou elementos construtivos que irão compor fisicamente o projeto idealizado pelo arquiteto. Considerando que, inicialmente, os sistemas CAD/CAM foram desenvolvidos para aplicações diferentes da arquitetura e construção, é importante observar quais aplicações são tão importantes para os arquitetos. Segundo Chaszar (2006, p. 8) estas são as características que mais inspiram os arquitetos a utilizar as ferramentas CAD/CAM:

- Visualização: a capacidade de apresentar informações gráficas tridimensionais altamente realísticas, além de produzir modelos físicos que auxiliam na compreensão espacial;
- Computação: a capacidade de executar operações numéricas ou textuais em alta velocidade e extrema precisão;
- Manipulação geométrica: a capacidade de controlar formas de grande complexidade ou relativamente simples, planejando, copiando, modificando e medindo, novamente, com extrema rapidez e precisão;
- Padronização: a capacidade de fielmente trocar informações, permitindo repetições de situações particulares de projeto de situações já passadas;
- Racionalização: a capacidade de tornar as decisões explícitas em soluções específicas, similar à padronização, mas verdadeiramente admitindo as variações.

O papel dos diferentes profissionais envolvidos na indústria da construção civil também está sendo modificado em consequência do surgimento dessas novas tecnologias. Novos nichos de atuação desses profissionais vinculados ao emprego das novas tecnologias estão sendo criados. A produção e inovação do processo de projeto com a utilização dos equipamentos de fabricação digital vêm renovando a maneira como o arquiteto projeta e chega ao produto final. Segundo Chaszar (2006, p. 15) “certamente a racionalidade da computação e a irracionalidade ou intuição de um bom projeto se tornam mais entrelaçados com o crescimento do uso das tecnologias CAD/CAM”. É importante ressaltar que o “arquiteto digital” e o profissional que se utiliza das novas tecnologias para projetar, modelar e construir arquitetura, não podem ser rotulados como aqueles que pretendem transformar tudo em uma arquitetura “*Blob*”¹, mas que utilizam a tecnologia digital como um aparato de transformação que integra diretamente a concepção e a produção de maneiras nunca vistas desde os *master*

¹ *Blob Architecture*: Kolarevic (2005, p. 4) define como “the desire of ‘blobify’ all and everything”, o desejo de transformar tudo em *blob* (bolha).

builders (empreiteiros) dos tempos medievais (Kolarevic, 2005, p. 4). Ainda segundo Kolarevic (2005), esse repentino e intenso interesse pelas formas *Blob* se deve aos *software* tridimensionais baseados em *Non-Uniform Rational B-Splines* (NURBS), que oferecem curvas e superfícies paramétricas. Estas ferramentas NURBS têm contribuído para a realização de um universo de formas complexas, as quais, até o aparecimento das tecnologias CAD/CAM, eram difíceis de ser concebidas. Com isso, a ligação entre os processos de concepção e construção é mais direta, pois a informação é rapidamente extraída, usada e compartilhada com mais facilidade e velocidade. Kolareric (2005, pp. 7) conclui que com o uso das tecnologias digitais, a informação de projeto é a própria informação da construção.

No Brasil, a aplicação dessas técnicas na arquitetura e construção ainda é muito restrita. Isso se deve provavelmente a fatores econômicos e sociais. Os econômicos estão relacionados aos altos custos dos equipamentos e insumos utilizados na construção dos protótipos, os quais são em sua maioria importados dos Estados Unidos, da Europa e da China, embora recentemente, algumas empresas nacionais tenham começado a investir no desenvolvimento e produção de maquinário para fabricação digital. Existe ainda uma grande limitação social ao emprego dessas técnicas para as áreas de arquitetura e construção no Brasil, visto que ainda não existe disponibilidade de mão-de-obra especializada nessa área. Nesse momento, é importante considerar que a introdução dessa nova tecnologia permite que o trabalho braçal pesado e sujeito a acidentes seja automatizado criando ao mesmo tempo uma maior demanda de trabalho intelectual nas áreas de programação, criação e modelagem digital. Novos postos poderão ser preenchidos por arquitetos, engenheiros civis, programadores e estudantes dessas áreas, propiciando a criação de novas colocações nas áreas de projeto, computação e operação de equipamentos.

Além disso, deve-se observar que as formas de *input* da informação de projeto são igualmente importantes nessa era digital. Hoje, a digitalização 3D, por meio de *software* específicos e de equipamentos especiais, é uma das formas mais comuns de

se trabalhar na transição de informações que o arquiteto possui durante o processo de projeto. A passagem do físico ao digital e vice-versa tem sido uma forma interativa e rápida de se obter informações importantes para as decisões projetuais. Paralelamente, os arquitetos vêm descobrindo, mais recentemente, outra ferramenta poderosa quanto à entrada de dados durante o processo de projeto: a programação. É tentadora a possibilidade de criar as próprias ferramentas de desenho e projeto, facilmente manipuladas e controladas pelo próprio projetista, por meio da programação. A modelagem paramétrica e as capacidades da geometria associativa têm colaborado para o surgimento de novas formas e novas soluções, embora muitos arquitetos ainda sustentem uma recusa em utilizar tais técnicas. Como exemplo, enquanto Frank Gehry inicia seu processo de projeto por modelos físicos 3D, que são digitalizados e convertidos em modelos digitais 3D e racionalizados para a construção, Greg Lynn manipula as formas diretamente no computador. Entretanto, nenhum deles utiliza o computador para a geração de formas via algoritmos (Schmal, 2005). Esta é uma área ainda não muito explorada por arquitetos, mas muito explorada por pesquisadores, especialmente fora do Brasil.

Esta utilização de *software* incorporando o conhecimento especialista inclui programas para simulação e testes em diferentes áreas do conhecimento, tais como estruturas, de energia, iluminação e acústica. Além disso, pode-se incluir também o uso de modelos digitais multidimensionais para representar as características geométricas e funcionais do ciclo de vida de um edifício, como é o caso do sistema BIM (*Building Information Modeling*), em que os modelos são constituídos por objetos que armazenam as características dos elementos construtivos em parâmetros (Scheer, 2008). Segundo Seebohm (2000), fazer com que o computador permita a geração e construção de formas tridimensionais anteriormente difíceis de ser conceituadas e construídas é talvez a influência mais óbvia e notória no processo de projeto.

Infelizmente, o ensino superior de arquitetura e de engenharia civil no Brasil ainda não prevê o uso desses novos métodos na produção de maquetes, protótipos e

componentes construtivos. Esta pesquisa analisa as inovações da informática aplicada ao projeto arquitetônico para que as novas tecnologias possam ser incorporadas de maneira mais efetiva ao processo de projeto, propondo uma reformulação na grade curricular em cursos de arquitetura e urbanismo. Para isso é fundamental a discussão da importância da inserção da prototipagem e fabricação digitais no currículo dos cursos, integrando-as às disciplinas de projeto e demais matérias da grade curricular. As abordagens discutidas nesta pesquisa definem as características de ambos os campos e apontam suas vantagens, procedentes da integração das duas áreas.

1.1. Problemática

O desafio assumido neste trabalho é o de introduzir a Prototipagem e a Fabricação Digitais no ensino de arquitetura para que os profissionais possam fazer uso dessas novas tecnologias. Os processos automatizados de manufatura com a habilidade de transformar modelos digitais em formas físicas permitem um aumento na complexidade do que pode ser construído, e a possibilidade de experimentação com exemplos tangíveis que envolvem o projeto. Entretanto, a inovação tecnológica proporcionada pelos novos processos de produção não consiste unicamente no desenvolvimento de uma tecnologia isolada e específica de produção digital, mas no conjunto de processos com tecnologias disponíveis para a produção de maquetes, protótipos finais e elementos construtivos a partir de modelos digitais. A utilização de *software* e *hardware* aqui incluídos, nesse contexto, não possui importância autônoma, mas sua utilização só se justifica na medida em que tornam possível o desenvolvimento de formas arquitetônicas de tal complexidade que jamais poderiam ser pensadas com os métodos e técnicas de desenho e maquetaria tradicionais.

1.2. Definições

Basicamente, dentre as diversas formas e técnicas de produção automatizada, de que se pode fazer uso hoje para a arquitetura e construção, a Prototipagem Rápida e a Fabricação Digital são os termos mais usados na recente literatura. Existe um grande problema de falta de consenso entre os autores da área quanto às definições e terminologias utilizadas para descrever as novas tecnologias de produção de arquitetura. Além disso, as diferenças de opiniões também recaem sobre quais métodos pertencem a cada processo. Nesse sentido, foram selecionadas definições de quatro importantes autores e relatadas. O primeiro deles é William Mitchell (Mitchell e McCullough, 1995, p. 212) que define CAD/CAM como o uso de modelos geométricos gerados por computador como a base para as instruções a processos de controle numérico. Estes autores definem Prototipagem rápida como “produção automatizada de maquetes físicas como parte do processo de projeto, frequentemente produzidas por tecnologias de formação incremental”. Para o segundo autor, Branko Kolarevic (2003), a prototipagem rápida é uma parte de um grande campo definido como fabricação digital, campo esse que divide as aplicações de prototipagem para o projeto e para a construção (CAD/CAM). O terceiro, Larry Sass (SASS e OXMAN, 2006), divide o campo da fabricação digital basicamente em duas escalas de representação: CNC e Prototipagem rápida. Considera o CAD/CAM como um sistema de construção que utiliza equipamento de peso que produz modelos na escala 1:1. A prototipagem rápida é definida pelo uso de técnicas que utilizam equipamentos menores que os de CAD/CAM, como as cortadoras a laser, e as técnicas subtrativas e aditivas. O quarto autor, Neri Volpato (VOLPATO et al 2007), embora da área de engenharia mecânica, é um dos poucos pesquisadores brasileiros a estudar a prototipagem rápida, definindo-a como “um processo de fabricação através da adição de material em forma de camadas planas sucessivas, isto é, baseado no princípio da manufatura por camada”.

Por essa diversidade de definições e enfoques, optou-se nessa tese pela utilização dos termos **PROTOTIPAGEM DIGITAL** e **FABRICAÇÃO DIGITAL**, como observado no esquema da figura 1.2. O primeiro inclui todas as técnicas de prototipagem rápida (sobreposição de camadas), corte a laser, fresas e corte com vinil, para a produção de maquetes em escalas reduzidas e protótipos em escala 1:1. O segundo termo, a **FABRICAÇÃO DIGITAL**, inclui técnicas destinadas à produção de edifícios ou partes deles (*file-to-factory*, *metal* e *tube bending*). Estas, por sua vez, destinadas à produção de fôrmas ou peças finais de edifícios, com equipamentos de CNC.

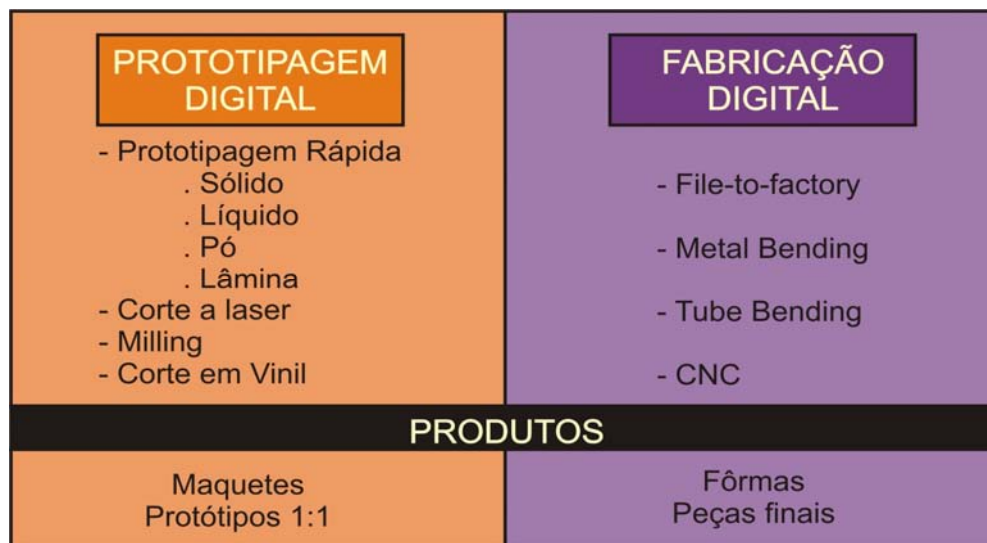


Figura 1.2: Campos de utilização de Prototipagem Digital e Fabricação Digital

Ambas as terminologias utilizadas nesta tese, prototipagem e fabricação digitais, referem-se a métodos que permitem a transição do modelo digital para o físico de maneira automatizada. Considerando que o produto final pode ser uma maquete ou um elemento construtivo, ou ainda um protótipo, a maneira com que ele é produzido delimita o tema estudado. Com isso, o objeto de estudo é determinado pelo uso da prototipagem rápida, cujas aplicações se limitam à produção de protótipos voltados à arquitetura, independentemente das técnicas utilizadas. A aplicação na produção de elementos construtivos será abordada como parte da fundamentação teórica, mas não como fator principal de estudo prático.

1.3. Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é discutir a importância da inserção das novas tecnologias de prototipagem e fabricação digitais no processo de projeto e sua inserção nos currículos dos cursos de arquitetura, de maneira integrada às disciplinas de projeto e demais matérias da grade curricular.

O objetivo específico é definir como é possível introduzir a tecnologia de prototipagem e fabricação digitais no ensino de arquitetura no Brasil.

1.4. Hipótese

Devido ao intenso desenvolvimento tecnológico das últimas décadas, nota-se um efeito ativo nas condições de produção da arquitetura. Em consequência disso, sua influência na maneira como a arquitetura é concebida e implementada deve ser analisada e discutida. É fundamental que uma reformulação na grade curricular dos cursos de arquitetura acompanhe essas mudanças. O papel da universidade é o de preparar o aluno para os desafios da profissão em um momento de inovações tecnológicas, sociais e políticas. Os cursos de arquitetura no Brasil, hoje, não estão preparados para os novos desafios que os avanços tecnológicos impõem na prática da profissão.

Há a necessidade de reestruturação curricular que acompanhe a evolução tecnológica. A presente pesquisa propõe a inserção das novas tecnologias no currículo dos cursos de arquitetura, permeando as demais disciplinas além das comumente utilizadas na prática da tecnologia da informação. No âmbito desta tese, dentre as diversas tecnologias disponíveis que devem ser inseridas na formação do arquiteto

contemporâneo, foram estudadas as que compõem os meios digitais de produção de arquitetura, como a prototipagem e fabricação digitais. Especificamente, dentre elas, a prototipagem rápida foi a tecnologia escolhida para os testes e experimentos, por ser o meio mais acessível e disponível.

1.5. Estrutura da tese

Para a completa compreensão sobre a importância, o uso e a aplicação das novas tecnologias de prototipagem e fabricação digitais no processo de projeto nos cursos de arquitetura no Brasil, a estrutura geral desta tese segue o esquema da figura 1.3. No esquema, os capítulos são representados pelos itens da coluna central.

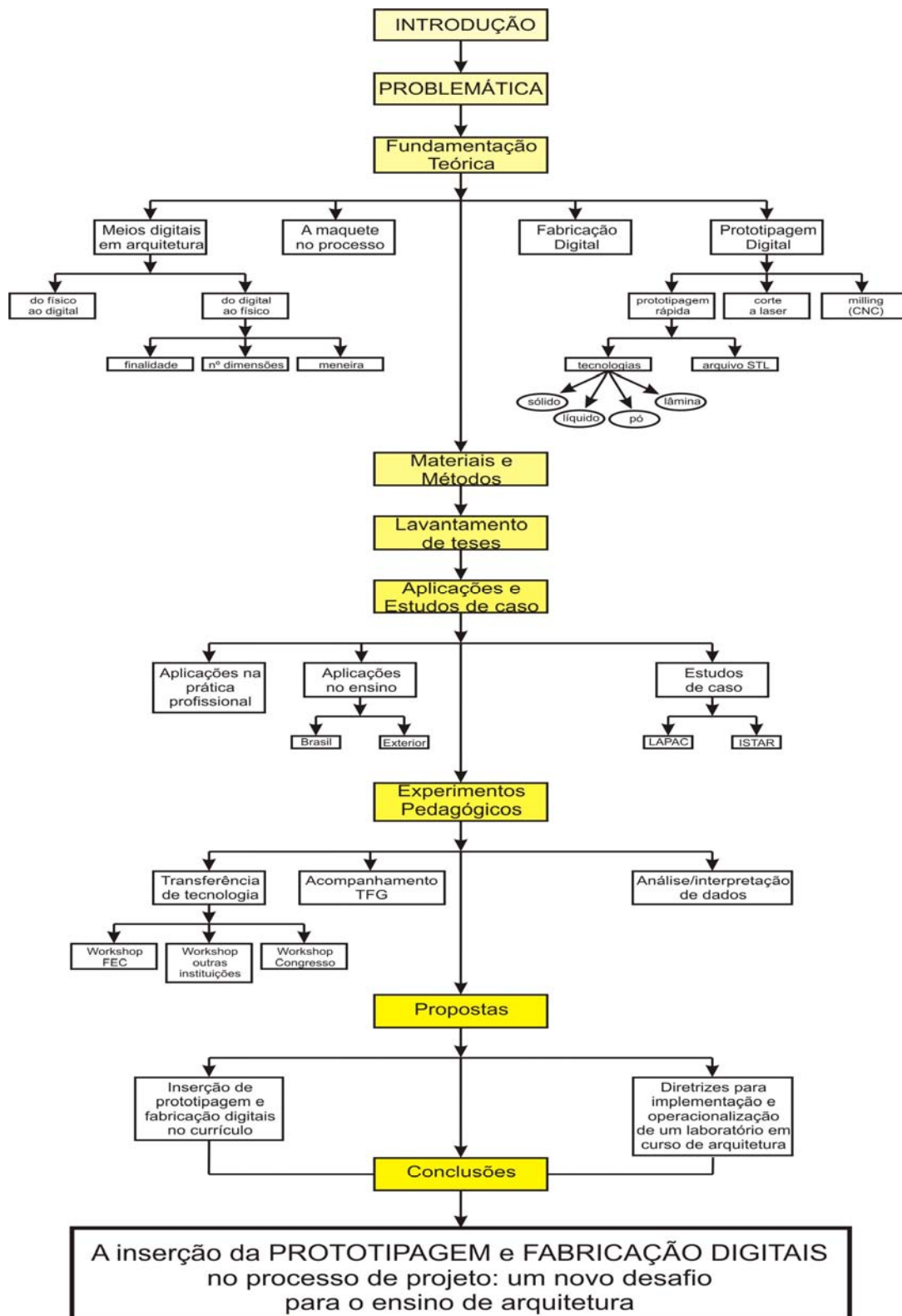


Figura 1.3: Esquema da estrutura da tese

2. Fundamentação Teórica

"By integrating the design, analysis, manufacture and assembly of buildings around digital technologies, architects, engineers and builders have an opportunity to fundamentally redefine the relationships between conception and production".
(Branko Kolarevic)

A inovação tecnológica alcançada nos últimos anos nas áreas de projeto e indústria da construção deve-se em grande parte ao desenvolvimento impetuoso da indústria da computação que tem introduzido novas técnicas, novos desafios e colocado novas ferramentas na rotina dos profissionais. Na área de arquitetura e construção, hoje, o processamento tridimensional tem se tornado processo padrão em vários procedimentos seja de projeto ou de fabricação direta. Um dos principais benefícios do desenvolvimento cada vez maior de seu uso é a opção de ter a visualização como grande colaboradora da compreensão espacial, bem como complemento e caminho para a confecção de modelos prototipados.

Herald Kloft, citado por Schmal (2001, p. 199) identifica que, atualmente, arquitetos descobriram como as novas tecnologias podem transformar a maneira como se faz arquitetura. Mas no passado, a geometria era modificada pelas descobertas de novos materiais e sistemas construtivos. Entre as décadas de 50 e 70, materiais "formativos" como o concreto e o plástico muito inspiraram arquitetos e engenheiros a tratar a forma de maneira mais livre e ilimitada. Mas a falta de planejamento e ferramentas adequadas para seu uso os confinou a continuar utilizando superfícies regulares.

Com a crescente utilização dos meios digitais disponíveis e acessíveis para as diferentes fases de projeto, arquitetos estão desenvolvendo novos métodos de projeto. Exemplificando, três arquitetos, três projetos, três metodologias de projeto, apresentam formas diferentes de projetar com a utilização híbrida de novas tecnologias e técnicas

tradicionais. Como demonstrado por Kloft, citado por Schmal (SCHMAL, 2001, p. 203), Frank Gehry, no projeto “*Forum for Furniture, Art and Culture*”, em Herford, criou suas formas manualmente, em modelos 3D, como usualmente faz, as quais foram posteriormente digitalizadas formando um banco de dados tridimensional da geometria obtida (Figura 2.1). Bernhard Franken, que geralmente utiliza *software* paramétrico como ferramenta de projeto, criou o modelo 3D do pavilhão BMW, em Frankfurt, no computador que foi subsequentemente prototipado para análise. Na construção desse pavilhão, a estrutura é composta de arcos de alumínio (Figura 2.2), cortados com tecnologia *Water-Jet* (jato d’água) e placas curvas de acrílico duplo fabricadas com métodos de produção digital. Peter Cook, no projeto para o concurso do museu em Graz, na Áustria, criou o projeto e a maquete “manualmente”, por falta de verba, e as formas tridimensionais foram regeneradas para o computador com a ajuda de um *software* (Figura 2.3).

Uma das principais diferenças no processo de projeto entre os três casos citados baseia-se no impacto que a estrutura apresenta na sua composição final, como resultado de cada método utilizado. Como Gehry inicia o processo manualmente, com maquetes, a adição de componentes individuais e independentes é uma característica importante. Por outro lado, as formas do pavilhão BMW, de Franken, foram criadas em um só bloco, facilitado pelo uso de *software* paramétrico, bem como no museu de Graz, por Cook. Neste último, a diferença é ter utilizado um *software* 3D como ferramenta escultural, ou seja, as formas foram criadas “manualmente” no computador, sem o uso de parametrização ou processos programados pelo arquiteto.

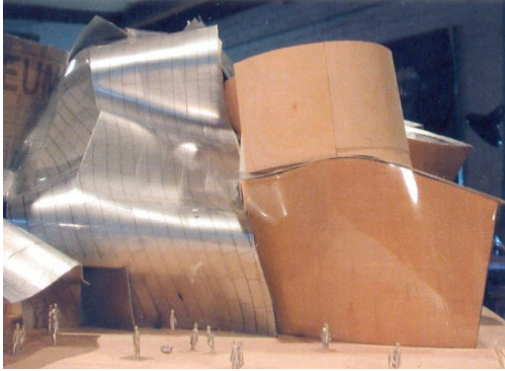


Figura 2.1: Maquete do "Forum for Furniture, Art and Culture", Frank Gehry
Fonte: Schmal (2001)

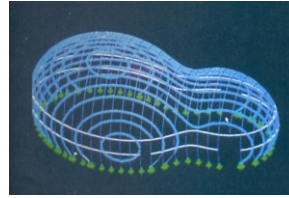


Figura 2.2: Pavilhão BMW, Bernhard Franken
Fonte: Schmal (2001)



Figura 2.3: Projeto para o concurso do museu Kunsthaus, Graz, Áustria, 2002-2003 Arq. Peter Cook
Fontes: Schmal (2001, p. 205) e Pottmann et al (2007, p. 673)

Uma das motivações desta pesquisa é poder melhor compreender novas alternativas para o processo de projeto tradicional, que se posicionam entre a geração de informações que descrevem o projeto e as informações para construí-los. Com isso, o *Design for Manufacturing* (DFM), ou projeto para a manufatura, tenta resolver dentro do próprio processo de projeto como ele será construído. É necessário, portanto, considerar fundamental o conhecimento da construção durante o processo de projeto quando se explora novas alternativas de produção. Os benefícios de se integrar design e construção podem ser entendidos por intermédio de estudos de custo e tempo à medida que ocorrem dentro do processo de projeto. Segundo Lyon (2005), para melhor entender e efetuar as mudanças dentro do processo deve-se saber que os recursos disponíveis para o repensar da arquitetura serão encontrados na reformulação dessa teoria e em sua prática, baseados em:

- Novas formas de representação que integrem o projeto e sua fabricação;
- Novas ferramentas projetuais empregadas com capacidades analíticas e operacionais permitindo aos arquitetos a exploração de novas formas de conceitualização e produção;
- Novas habilidades que focam não somente novas maneiras de se criar formas, mas também de produzi-las.

Existe uma tendência em ascensão de projetos de arquitetura contemporânea com certa dependência de processos digitais em suas organizações e avaliações técnicas. A utilização de meios digitais é um ponto central para a geração da forma e análise estrutural como também para a integração entre a concepção, fabricação e construção, a partir das fases iniciais de projeto. Entretanto, é importante considerar que as tecnologias digitais disponíveis visam somente o próprio processo de projeto. Cada técnica, seja de representação ou análise, traz vantagens e desvantagens ao processo, e devem ser observadas. É perfeitamente possível desenvolver uma sucessão de diferentes modelos digitais nas fases iniciais de projeto (Szalabaj, 2005). Para isso, novos caminhos estão sendo abertos e trilhados por profissionais que visam a interação das técnicas tradicionais com as novas tecnologias nas diversas fases do processo de projeto.

2.1. Meios digitais para arquitetura

O projeto e a produção da arquitetura têm sofrido grandes modificações desde a segunda metade do século XX, com o desenvolvimento dos sistemas CAD/CAM. Mais recentemente, tornou-se possível utilizar modelos geométricos digitais diretamente para a produção de produtos físicos, desde maquetes em escala e protótipos em tamanho real até peças finais para a construção civil. Essa nova possibilidade tem causado um enorme impacto desde o início do processo de projeto do edifício até a sua construção

(MITCHELL e MCCULLOUGH, 1994). Kolarevic (2005, pp. 3) completa que os sistemas CAD/CAM abrem novas possibilidades permitindo a produção e construção de formas muito complexas, que até muito recentemente eram difíceis e de custo elevado para serem produzidas e montadas usando as tecnologias tradicionais de construção.

Mitchell e McCullough (1994) definiram uma estrutura que resume as relações entre as técnicas digitais e tradicionais para arquitetura com as possíveis conexões entre as várias representações. A figura 2.4 ilustra o diagrama que é composto pelas possíveis relações entre desenhos 2D, modelos físicos e modelos digitais, todos de alguma forma conectados com o edifício.

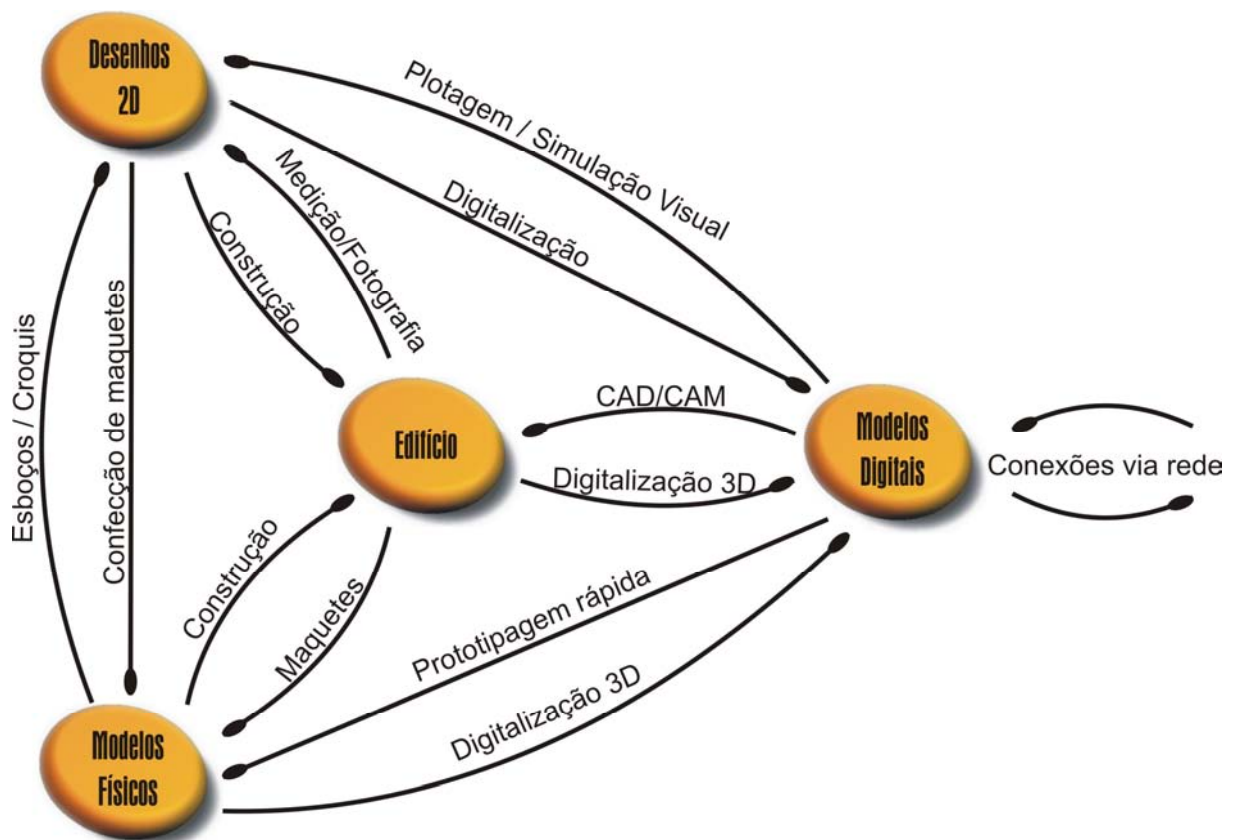


Figura 2.4: Estrutura de relações entre as técnicas digitais e tradicionais para arquitetura e construção
Fonte: Adaptação de Mitchell e McCullough (1994)

Dentre esses processos apontados por Mitchell, alguns já têm sido explorados ao longo do processo de projeto há algum tempo. Desenhos 2D, por exemplo, podem ser utilizados para a confecção de maquetes (modelos físicos), além de, através da digitalização, obter modelos digitais, para serem manipulados no computador. A partir do edifício, podem-se obter maquetes em escalas reduzidas, assim como obter desenhos 2D através de técnicas de medições ou fotografias. Ainda, as conexões via rede, em projetos colaborativos, já vêm sendo difundidas em diversos lugares do mundo, facilitando a comunicação, suporte e otimizando o tempo de processo. Contudo, algumas das relações apontadas por Mitchell ainda estão em fase de desenvolvimento, com pesquisas em universidades e testadas e utilizadas, com sucesso, por arquitetos do mundo inteiro. Na figura 2.5, as técnicas já consolidadas e amplamente utilizadas na arquitetura e construção são representadas por linhas pontilhadas (em vermelho), enquanto as técnicas em desenvolvimento são representadas pelas linhas tracejadas (em azul).

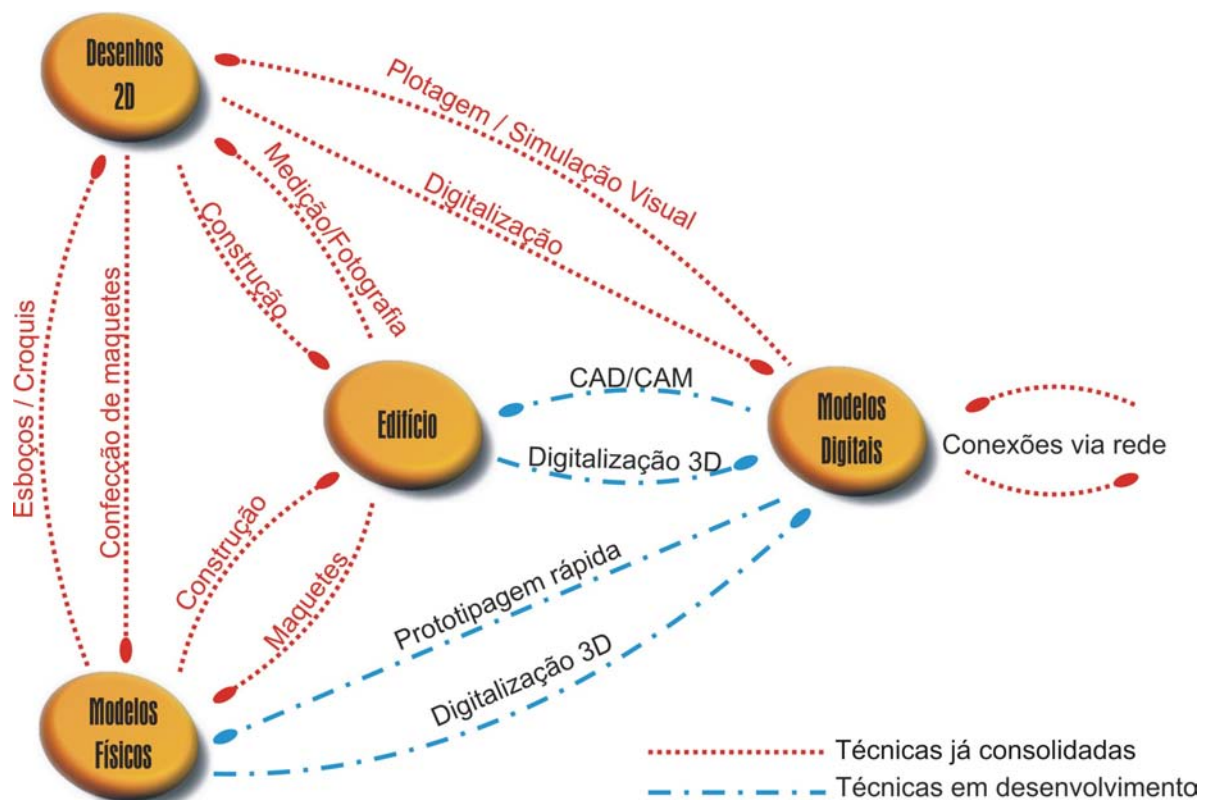


Figura 2.5: Diferenciação entre técnicas já consolidadas e em desenvolvimento
Fonte: Adaptação de Mitchell e McCullough (1994)

Assim, dentre as técnicas em desenvolvimento, o escopo desta tese é o de estudar, a partir de modelos digitais, suas relações entre modelos físicos e o edifício, representadas pela prototipagem rápida e o CAD/CAM, respectivamente (Figura 2.6). É importante ressaltar que esta pesquisa, apesar de reunir dados e conceitos importantes a respeito das técnicas de CAD/CAM, voltadas à fabricação e às técnicas de digitalização 3D, os experimentos efetuados e relatados no item 6, se concentraram na produção de modelos físicos em escala reduzida, a partir de modelos digitais. Isso se deve ao acesso facilitado e presente de equipamentos de prototipagem digital disponíveis na universidade onde esta tese se desenvolveu.

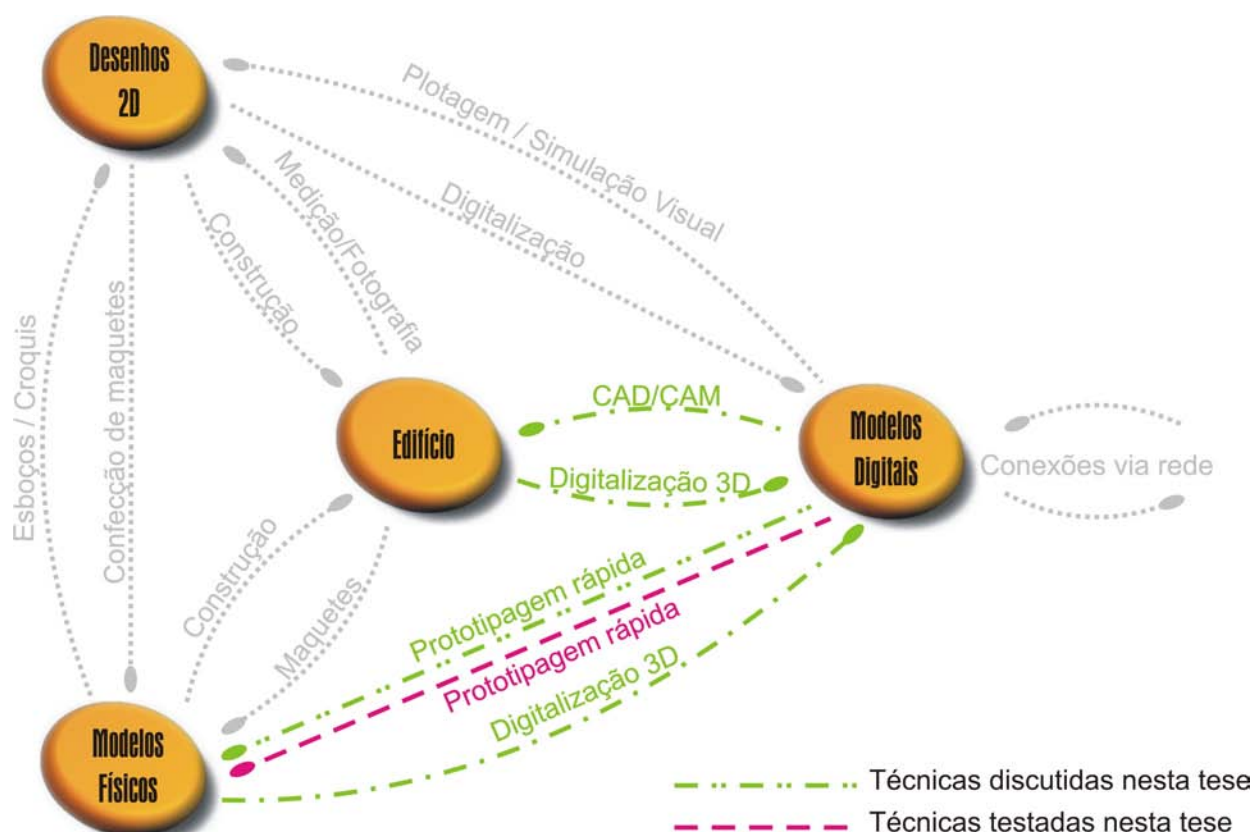


Figura 2.6: Técnicas discutidas e testadas nesta tese
Fonte: Adaptação de Mitchell e McCullough (1994)

O processamento tridimensional na área de arquitetura e construção tem se tornado processo padrão em vários procedimentos, fazendo com que técnicas de produção de protótipos ou de peças finais, produzidas digitalmente, se transformem em grandes aliadas dos novos desafios projetuais. Essa nova possibilidade tem causado

um enorme impacto desde o início do processo de projeto do edifício até a sua construção (Mitchell e McCullough, 1994), contribuindo para mudanças na forma de projetar e em sua produção, automatizando tarefas e introduzindo novas tecnologias.

De acordo com Breen (2007), na prática da arquitetura contemporânea, a introdução de novas formas de métodos de produção com a ajuda do computador iniciou uma atitude animadora pós-industrial na direção da materialização, tanto do projeto, quanto de elementos construtivos. Considerando que a aproximação modernista ao projeto de arquitetura e à construção tinha uma tendência de envolver uma seleção de elementos *standard* (padrão), produzidos industrialmente em larga escala, o panorama da arquitetura atual parece estar radicado no projeto individualizado com componentes pré-estabelecidos e elementos de superfície produzidos em pequenas séries, ou seja, customizados.

A diferença entre os novos métodos de produção baseados em modelos digitais e os antigos métodos de produção de massa é que os primeiros não se destinam a produzir cópias idênticas de um mesmo produto. Pelo contrário, constituem-se em sistemas suficientemente adaptáveis para produzir um grande espectro de formas diferentes. Esse novo conceito tem sido chamado de “*mass customization*” (personalização em massa) e foi definido por autores como Stan Davis (1996), Tseng e Jiao (2001), Pine (1993), e Kaplan e Haenlein (2006). Na arquitetura, o pioneiro no uso do termo foi José Pinto Duarte, em sua tese de doutorado intitulada “*Customizing Mass Housing: a discursive grammar for Siza's houses at Malagueira*” (DUARTE, 2001), recém transformada em livro, na língua portuguesa – “Personalizar a habitação em série: uma gramática discursiva para as casas da malagueira do Siza”, publicado pela Fundação Calouste Gulbenkian, Portugal (2007), cujo objetivo é o desenvolvimento de uma estrutura computacional para a provisão de habitações em série personalizadas que inclua um sistema de projeto e um sistema de produção (Duarte, 2007, p. 1).

A customização (ou personalização) em massa está começando a causar impacto na indústria da construção. Contudo, segundo Schodek et al. (2005, p. 341), muitas das atuais tentativas de integração entre um ambiente específico de projeto e o seu processo de fabricação ainda não se assemelham ao que realmente representa a customização em massa, mas na realidade representam um enfoque diferente nas relações comerciais. Em qualquer área de atuação, fatores econômicos são típicos da customização em massa. Na arquitetura, por exemplo, ela tem se mostrado muito eficiente no projeto e fabricação na customização de janelas. Empresas como a e-Skylight², dos Estados Unidos, por exemplo, utilizam sistemas orientados a objetos para projetar e manufaturar clarabóias customizadas.

A interface de projeto *on-line* (Figura 2.7) oferece uma série de etapas com parâmetros definidos pelo usuário, tais como dimensões, número de divisões dos painéis de vidro e tipo de acabamento, finalizando com a obtenção de um objeto 3D. O mesmo modelo, com o auxílio de um programa de sistema CAM, gera as instruções para a fabricação e as especificações 2D, inclusive a rotina de “*nesting*”³, para melhor aproveitamento de material. Após a fabricação de todas as peças, as clarabóias são previamente montadas para evitar erros no momento da montagem na obra, mantendo um alto controle de qualidade (Figura 2.8).

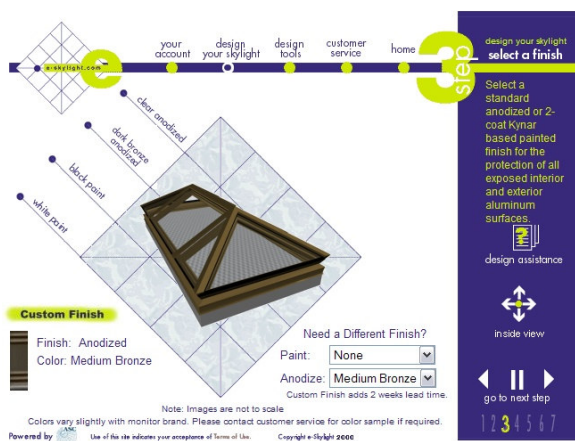


Figura 2.7: Interface de projeto on-line
Fonte: www.e-skylight.com



Figura 2.8: Montagem prévia das peças em CNC
Fonte: Schodek (2005, p. 344)

² www.e-skylight.com

³ *Nesting*: otimização do aproveitamento de material

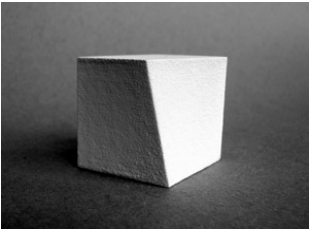
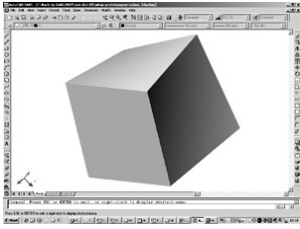
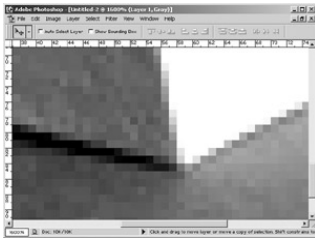
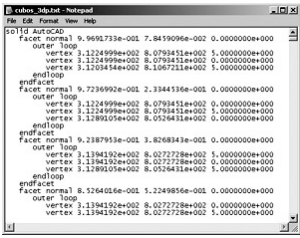
2.1.1. Do físico ao digital

O processo que transforma o modelo físico em modelo digital é considerado o inverso da tecnologia CAM. Para a obtenção de uma representação geométrica digital a partir de um modelo físico 3D, algumas técnicas de digitalização 3D são utilizadas, em um processo geralmente chamado de Engenharia Reversa. Mitchel (1990), explica “digitalizar” como sendo a reprodução de um objeto por meios de uma “representação digital”, diferente de uma representação analógica, que podem ser um desenho ou uma maquete 3D. Em outras palavras, significa reproduzir algo que exista no mundo real com algum tipo de informação digital e que possa ser armazenada em um computador. Pottmann et al (2007, p. 601) caracteriza esse processo como “um problema de reconstrução digital”, explicando que, embora existam poderosos programas de computador para dar suporte na transformação de modelos físicos em modelos digitais, um bom conhecimento da geometria e um sólido entendimento do processo de digitalização podem trazer excelentes resultados. É fundamental observar o que realmente é importante ser capturado, pois existem vários aspectos de um objeto, como a geometria da superfície, a aparência, sua materialidade e aspectos geométricos, que podem orientar o processo. O direcionamento adequado ao processo de captura de dados minimiza tempo e erros decorrentes de práticas mal utilizadas. Isso significa que o conhecimento das técnicas disponíveis juntamente com um planejamento de ação facilita todo o processo.

A tabela 2.1 mostra dois tipos de representações digitais do mesmo objeto, um cubo – uma imagem digital (raster) e um modelo geométrico (vetorial) – e as diferenças entre ambos quanto ao que se vê na tela e o que se pode armazenar na memória do computador. As imagens digitais são armazenadas como uma matriz 2D de pontos (coloridos ou em tons de cinza). Cada ponto é representado na memória por um número que especifica seu valor tonal, gerando formatos de arquivos como BMP (*Bitmap*), JPG (*Joint Photographic Experts Group*), GIF (*Graphics Interchange Format*),

etc. Modelos geométricos, por outro lado, são armazenados por uma série de vetores que descrevem a geometria do objeto no espaço tridimensional, em formatos como DXF (*Drawing Exchange Format*), DWG (*Drawing*) e STL (*Stereolithography*), entre outros. A divergência entre esses dois tipos de representações é o fato de que no primeiro, o computador “não sabe” que o modelo representa um cubo com suas dimensões, ângulos e volumes.

Tabela 2.1: Dois tipos diferentes de representações digitais do mesmo objeto do “mundo real”
 Fonte: Celani et al (2008)

	Imagem Digital (2D)	Modelo Geométrico (3D)
Visualização na tela do computador		
Dados armazenados na memória do computador		
Formato do arquivo	BMP, JPG, GIF, etc.	DXF, DWG, STL, etc.

Existe ainda uma diferença entre os métodos de obtenção dos dois tipos de representações acima descritos. Imagens digitais de objetos do “mundo real” são obtidas com câmeras digitais, que convertem a imagem ótica capturada em sinais eletrônicos, pixel⁴ por pixel. O valor correspondente a cada pixel é então armazenado

⁴ Pixel: A menor unidade gráfica de uma imagem matricial, e que só pode assumir uma única cor por vez.

em uma matriz de pontos, em formato digital. Os modelos geométricos do “mundo real” podem ser obtidos “manualmente”, semi-automatizados e automatizados. No método manual, o projetista mede o objeto (com uma trena ou qualquer outro equipamento manual) e utiliza um programa CAD para produzir um modelo geométrico do objeto, entrando com os valores medidos. Este método é rápido e fácil se o objeto tiver uma geometria simples, mas pode ser muito trabalhoso e demandar muito tempo se o objeto possuir uma geometria mais complexa.

Nos métodos automatizado e semi-automatizado tanto a medição quanto a modelagem geométrica são feitas com pouca ou nenhuma intervenção do usuário. São muito mais rápidos que os manuais, especialmente para a modelagem de superfícies complexas. Existem dois tipos principais de métodos automatizados para digitalização de objetos do mundo real, os sem contato e os por contato (Sá et al, 1999). A figura 11 mostra esses dois tipos e as derivações de cada um.

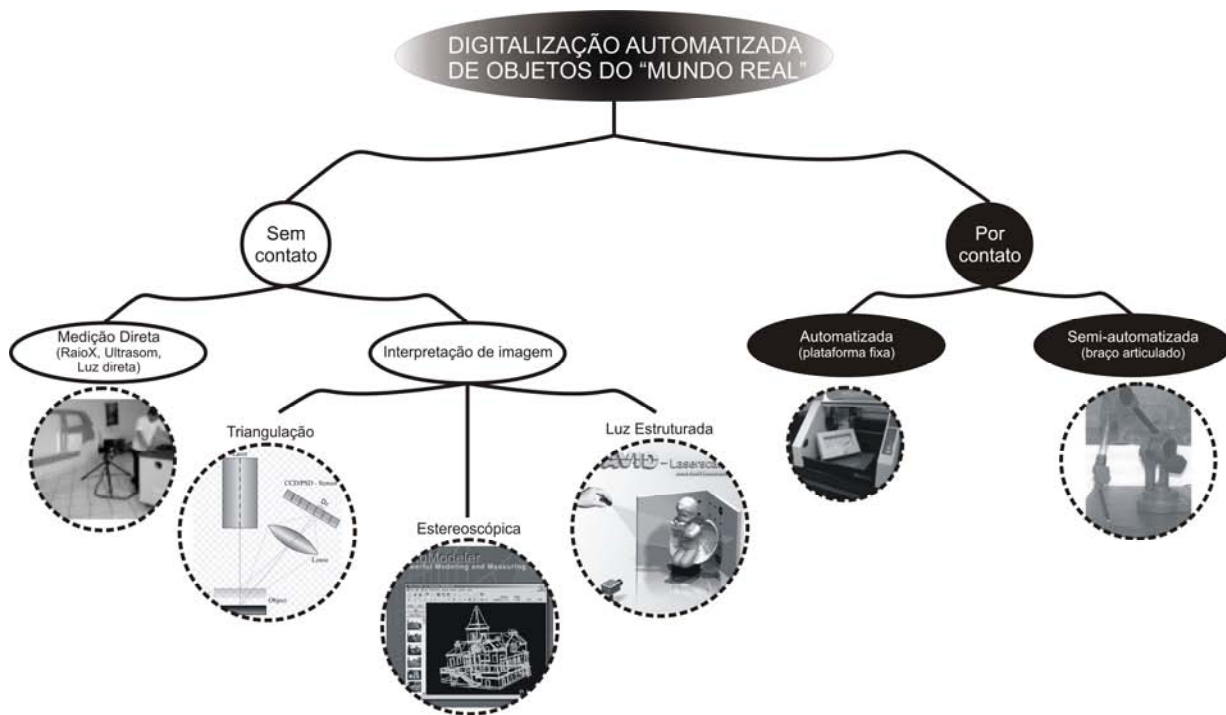


Figura 2.9: Métodos de digitalização automatizada

Entre os métodos sem contato, existem dois subtipos: por medição direta ou por interpretação de imagem. Os métodos sem contato utilizam um aparelho que emite algum tipo de radiação ao objeto e detecta sua reflexão (Figura 2.10). A principal vantagem desse tipo de digitalizador é o fato de não danificar o objeto a ser digitalizado, embora em alguns casos possa ser necessário utilizar um pó branqueador na peça, em *spray*, a fim de aumentar a reflexão. Diferentes tipos de radiação podem ser utilizados: luz branca, laser, infravermelho, ultrassom, raios-X, etc. Alguns métodos permitem adquirir os dados mesmo de dentro de um objeto fechado, tais como imagem por ressonância magnética (MRI – Magnetic Resonance Imaging) e tomografia computadorizada (TC).

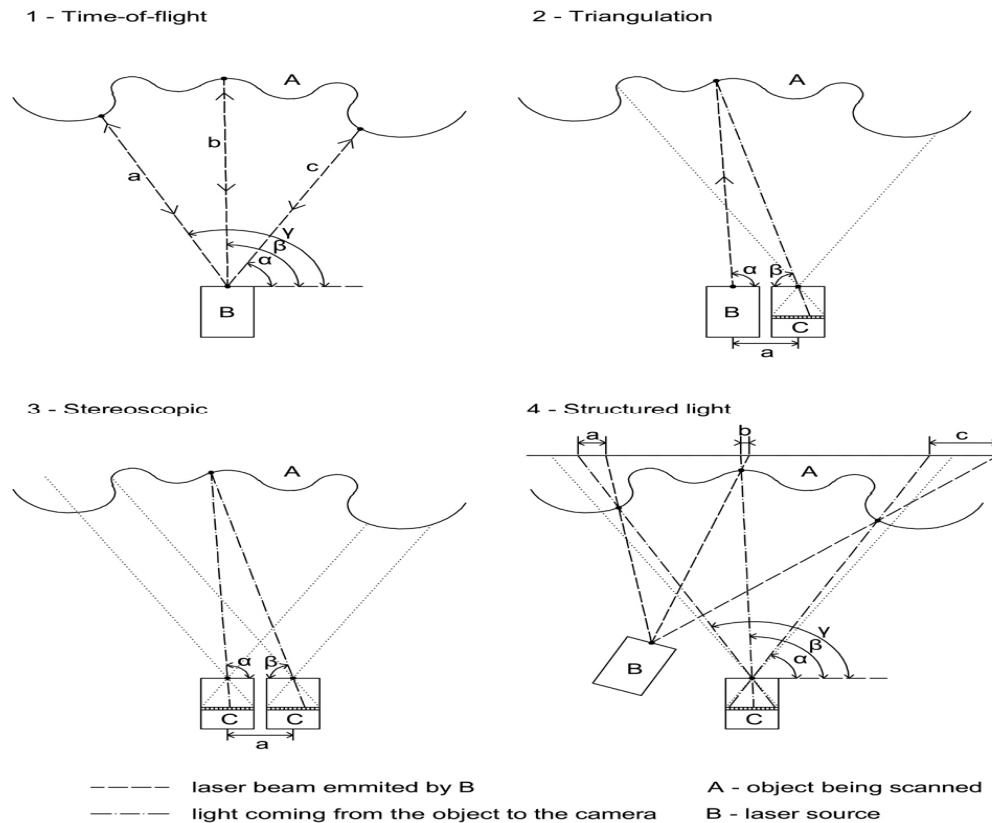


Figura 2.10: Os quatro tipos principais de métodos de não contato
 Fonte: Celani et al (2008)

Em alguns casos, nos métodos sem contato, a radiação, geralmente um raio de laser, é usada para medição direta da distância entre o *scanner* e o objeto. A distância

é calculada medindo o tempo que o laser leva para alcançar o objeto e voltar ao sensor do aparelho. Este método, chamado de *time-of-flight* (tempo de voo) permite digitalizar objetos distantes, como prédios inteiros, e é geralmente utilizado em arquitetura, arqueologia e levantamento territorial (Gambino et al, 2006).

O segundo tipo de digitalização sem contato é baseado em interpretação da imagem. Existem três tipos principais desse método: (1) triangulação a laser, (2) estereoscopia e (3) luz estruturada. Embora o método de interpretação de imagens não requeira equipamentos caros, os *software* podem ter preços mais altos. Entretanto, existem programas alternativos, certamente com algumas limitações, não tão caros e que podem servir. O método de triangulação a laser utiliza um raio de laser que é projetado no objeto em um ângulo conhecido. Uma câmera posicionada a uma distância também conhecida da fonte de laser “vê” a marca de laser no objeto. A distância do ponto até a câmera é então calculada pela triangulação (SATYAPRAKASH, 2007). Este método é muito preciso e pode ser utilizado em objetos de médio e pequeno porte.

O método estereoscópico precisa de duas fotografias do mesmo objeto tiradas de dois pontos diferentes e conhecidos. Uma vez conhecidos os ângulos de incidência da luz vinda do objeto até a câmera, é possível calcular a distância de cada ponto. A concordância dos pontos nas duas fotografias pode ser feita de maneira automatizada ou manual. Geralmente, as superfícies mais complexas e orgânicas são bem trabalhadas na maneira automatizada, enquanto formas geométricas na manual. No método de luz estruturada, uma luz é projetada no objeto com um projetor de LCD, uma lanterna ou um feixe de laser (SÁ et al., 1999). Uma câmera de vídeo é usada para capturar a imagem. A distância entre os pontos do objeto é calculada baseada na deformação da imagem projetada.

Segundo Rowe (2008), geralmente existem muitos dados na nuvem de pontos coletada por um digitalizador, e muitos deles não serão necessários. Sem um pós-

processamento, os dados não podem ser utilizados por aplicativos finais, como *software* CAD/CAM ou em prototipagem rápida. Depois de digitalizados os objetos, os dados adquiridos devem ser processados. A maioria dos digitalizadores 3D produz nuvem de pontos que necessitam ser reconstruídos em polígonos 3D, para que possam gerar uma superfície contínua. Programas de Engenharia Reversa serão necessários para a geração de modelos geométricos apropriados para o uso em CAD 3D ou na impressão 3D.

O método por contato utiliza uma máquina de medição por coordenadas (CMM - *Coordinate Measuring Machine*), que é um aparelho de digitalização mecânica. Este tipo de aparelho possui uma sonda de medição que obtém os diferentes pontos do objeto para enviar suas coordenadas ao computador. Existem dois tipos de máquinas CMM: articuladas e de plataforma. Na primeira, a sonda é localizada na ponta de um braço articulado, que é manualmente posicionado pelo usuário em pontos diferentes do objeto a ser digitalizado (Figura 2.11). Esse método pode ser bem adaptado para a captura de pontos especialmente selecionados do objeto.

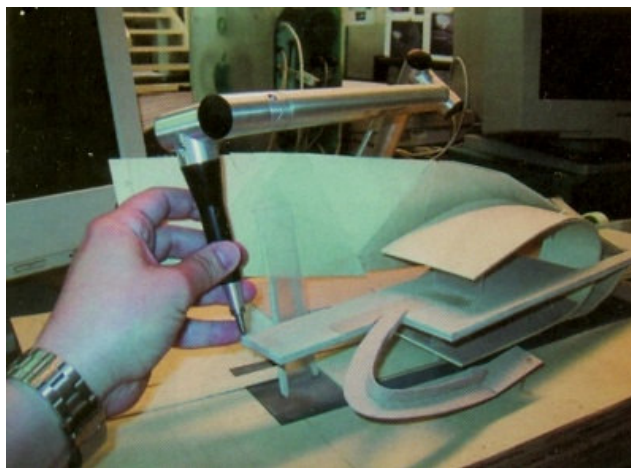


Figura 2.11: Uso de braço articulado para a digitalização 3D
Fonte: Pottmann (2008, p. 606)

No segundo tipo de máquina CMM, o objeto é posicionado numa superfície horizontal enquanto a sonda (uma agulha de digitalização) o inspeciona

automaticamente. O sistema de plataforma é geralmente mais rápido do que um braço mecânico, mas não consegue acessar planos inclinados negativos. O exemplo da figura 2.12 ilustra o processo de digitalização 3D de uma peça de cerâmica originalmente modelada à mão. A agulha de digitalização, em movimentos nas três dimensões, X, Y e Z, marca cada ponto da peça e gera um objeto aramado, que pode ser editado e renderizado. Posteriormente, no caso deste equipamento, a Modela MDX-40 da empresa japonesa Roland, o objeto pode ser fresado na mesma plataforma, com a troca da agulha de digitalização por uma fresa.

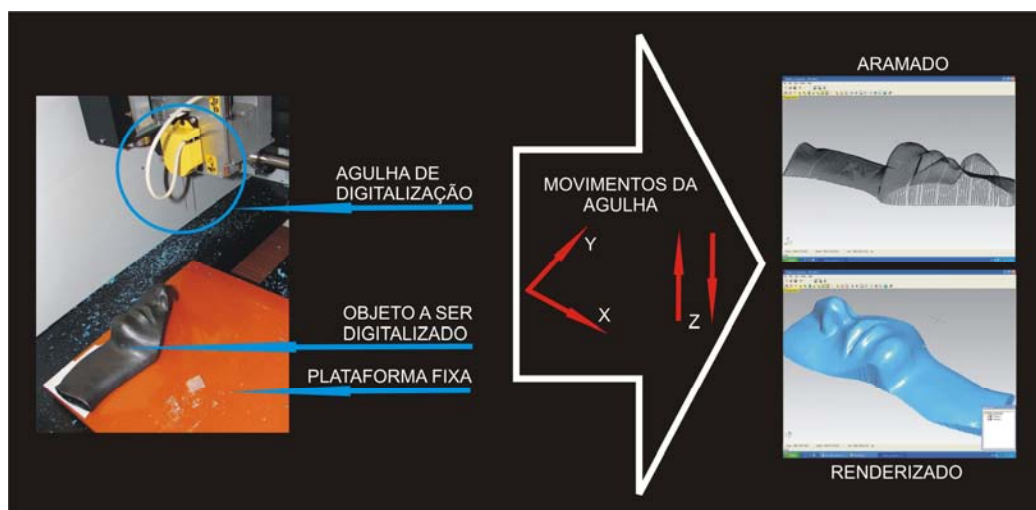


Figura 2.12: Método de digitalização por contato de plataforma
Fotos e montagem: Regiane Pupo

2.1.2. Do digital ao físico

Os métodos de produção automatizada utilizados na arquitetura e construção podem ser categorizados segundo: (1) sua finalidade, (2) o número de eixos com que trabalham e (3) a maneira como produzem os objetos. A figura 2.13 ilustra cada uma dessas categorias e todas as possíveis utilizações na área de arquitetura e construção civil. Suas aplicações podem variar desde a produção de maquetes de estudo para o

apoio ao processo de projeto até a construção de edifícios inteiros, passando pela elaboração de elementos construtivos, construídos e enviados diretamente para a obra. Cada método é discutido e ilustrado com exemplos de aplicação a seguir.

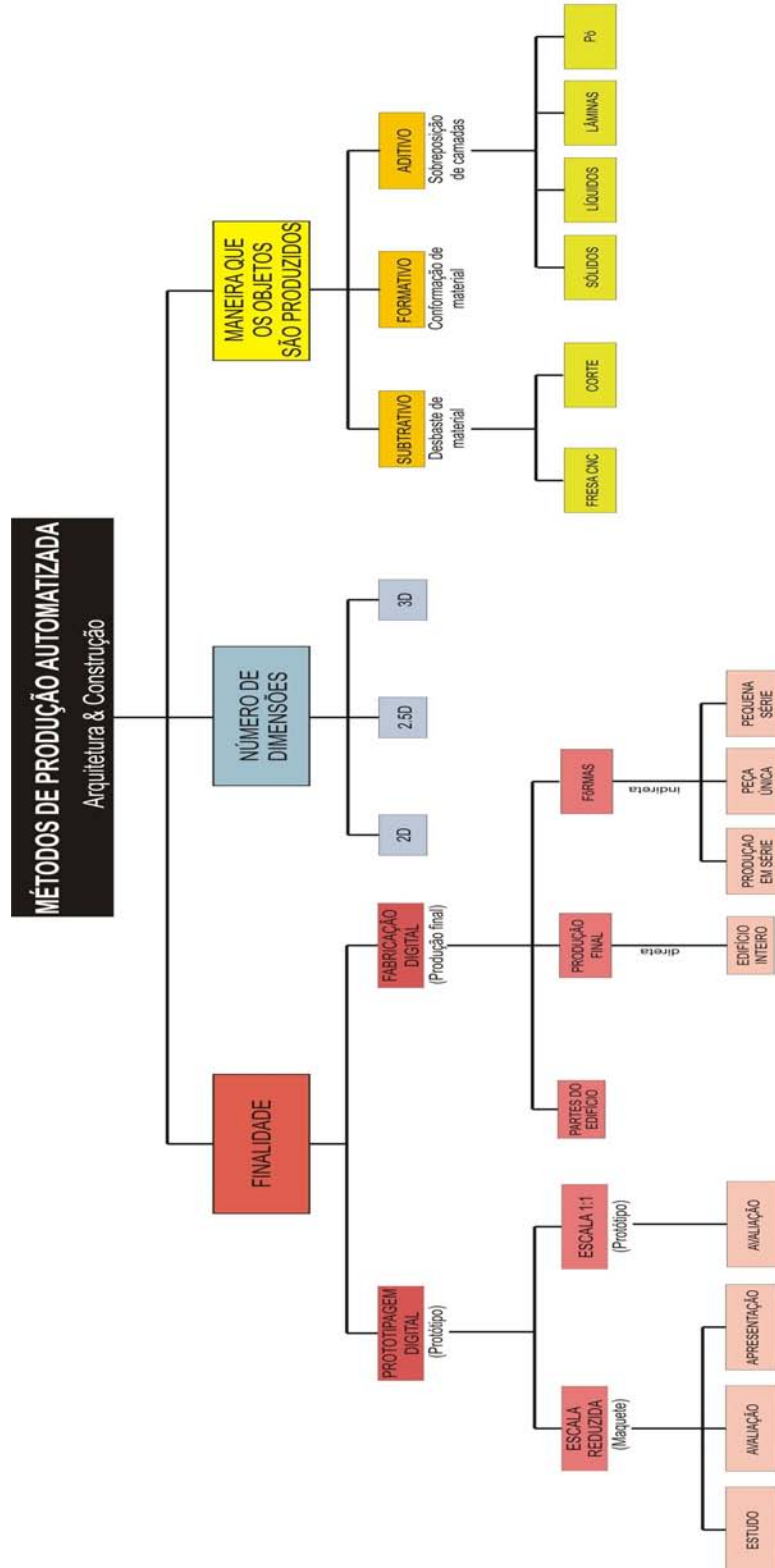


Figura 2.13: Métodos de produção automatizada para arquitetura e construção

Quanto a finalidade

Com referência à sua finalidade (Figura 2.14), os métodos podem ser destinados à produção de protótipos ou de produtos finais, estes últimos para serem empregados diretamente na obra. Nesta tese, estes dois campos de aplicação foram definidos como (1) Prototipagem Digital, em que as técnicas são destinadas a produção de modelos (maquetes) em escalas reduzidas e protótipos em escala 1:1 para avaliações, e (2) Fabricação Digital, em que as técnicas se destinam à produção final, seja do edifício inteiro, de partes dele ou de fôrmas para a produção de elementos construtivos. Na prototipagem digital, as maquetes podem auxiliar no desenvolvimento de projetos de alta complexidade em todas as suas fases (da concepção ao detalhamento executivo) e na comunicação com equipes de obra durante sua execução. Podem ser classificadas para uso em estudos iniciais, para avaliações de projeto ou para apresentações finais. Nos estudos iniciais, os modelos auxiliam na ilustração de conceitos arquitetônicos, no ensino e na orientação espacial em edifícios para equipes de trabalho.

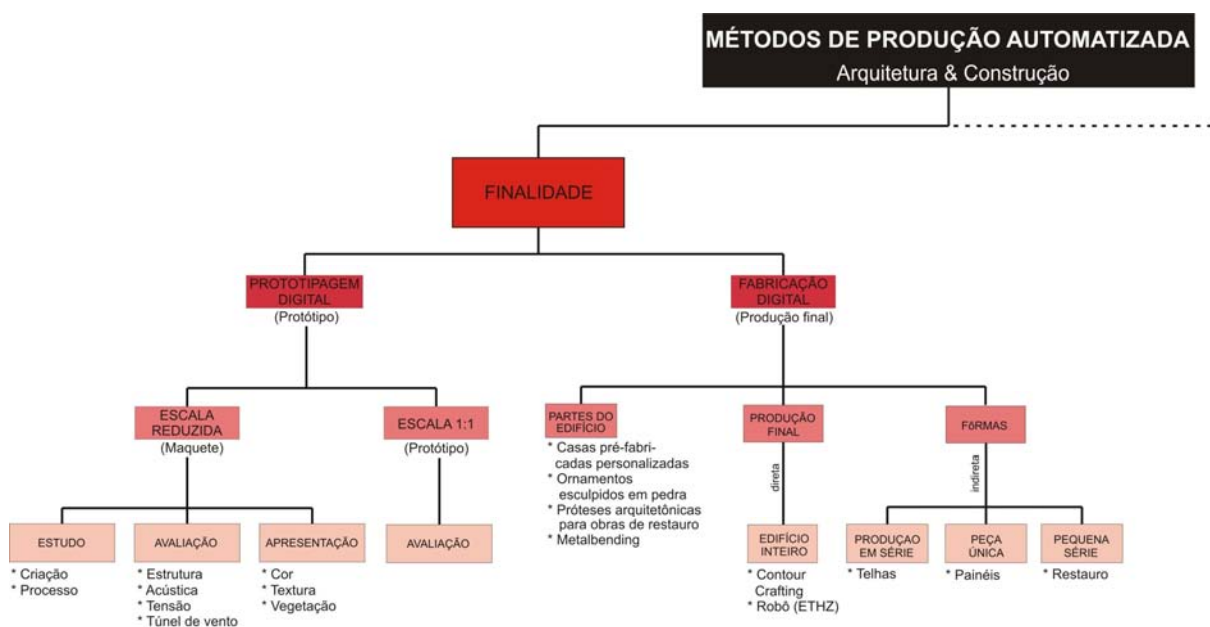


Figura 2.14: Método de produção automatizada para Arquitetura e Construção por finalidade

As maquetes para avaliações de projetos destacam-se pela necessidade de análises estruturais, de comportamentos acústicos ou para serem testadas em túnel de vento. Em experimento feito no laboratório de automação e prototipagem para arquitetura e construção (LAPAC) da FEC, na UNICAMP, foi improvisado um túnel de vento com um modelo prototipado na impressora 3D. O trabalho consistia em analisar uma parte do Hospital Sara, no Rio de Janeiro, do arquiteto Lelé, em que o objetivo era o de entender a ventilação através dos brises contidos no projeto. Com gelo seco e um aspirador de pó, foi possível analisar as correntes de vento através das aberturas do modelo (Figura 2.15). A maquete física de avaliação nesse caso foi fundamental para a execução da pesquisa, mesmo em condições precárias de análise da ventilação.

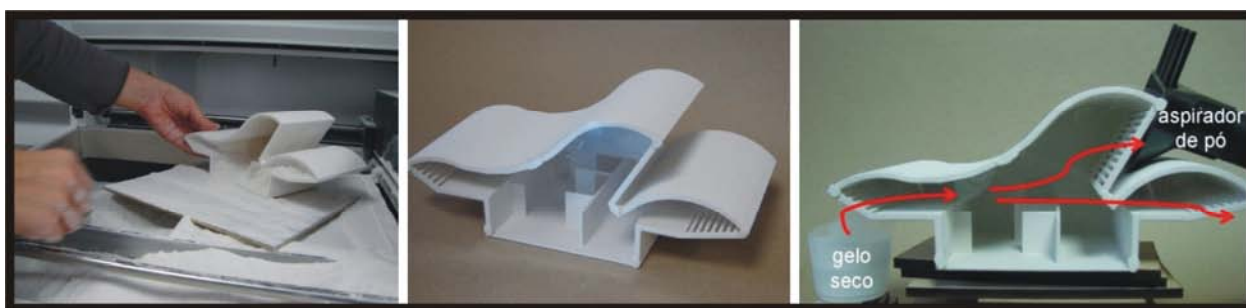


Figura 2.15: Estudo de túnel de vento com protótipo executado na impressora 3D
Fotos: Regiane Pupo

As maquetes de apresentação destinam-se para análises de cor, textura, ou mesmo vegetação (no caso de projetos paisagísticos) com elevado grau de detalhamento, quase sempre destinados a *stands* de vendas e *showrooms* ou para apresentação a clientes (Figura 2.16).



Figura 2.16: Maquete de apresentação prototipada
Fonte: Fonco Design - <http://www.foncocreative.net/>

Se a finalidade for a construção de protótipos em escala 1:1, com o objetivo de avaliações, os modelos são igualmente produzidos digitalmente, mas fabricados com equipamentos de maior porte que aqueles destinados à fabricação de maquetes, geralmente máquinas do tipo CNC. A finalidade de construção de protótipos nessa escala pode ser para avaliações ergonômicas, funcionais ou mesmo estrutural, se os materiais utilizados forem de acordo com os especificados no projeto original. Um exemplo desse tipo de aplicação está ilustrado na figura 2.17, em que a construção de um protótipo em escala 1:1, em CNC, foi fundamental para a compreensão do projeto de um ponto de táxi. Trata-se do vencedor do concurso *Táxi Stand*, ocorrido em Lisboa, Portugal, em 2007, entre as escolas de arquitetura daquele país.



Figura 2.17: Protótipo final em CNC do primeiro prêmio Concurso *Táxi Stand*, Lisboa, 2007
Fotos: Regiane Pupo

No método para a fabricação digital, as aplicações das técnicas de produção de partes do edifício, para serem instaladas diretamente na obra, podem ser direcionadas à construção de casas pré-fabricadas personalizadas, à ornamentos esculpidos, para obras de restauro/reconstituição histórica, ou ainda no sistema chamado de *Metalbending*, onde chapas de metal são dobradas e colocadas diretamente na edificação. Esse é o caso do museu Guggenheim, de Frank O. Gehry, em Bilbao, Espanha (Figura 2.18).

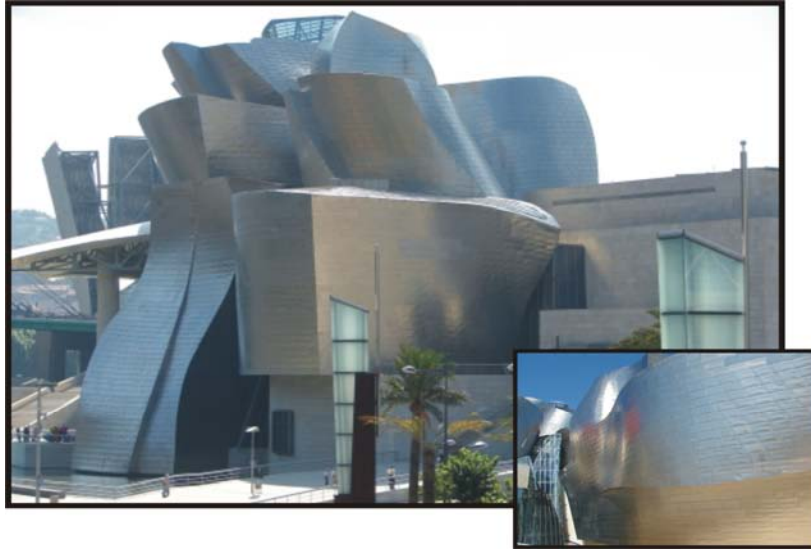


Figura 2.18: Metalbending no Museu Guggenheim, Bilbao Espanha
Fotos: Regiane Pupo, 2007

Na produção final de edifícios, considerada como uma finalidade direta é possível atuar na construção automatizada de um edifício inteiro ou de parte dele, sem utilização de mão-de-obra humana. Um dos processos, chamado "*Contour Crafting*", ilustrado nas figuras 2.19 e 2.20, foi desenvolvido pelo professor de engenharia industrial Dr. Behrokh Khoshnevis, da University of Southern Califórnia, EUA. É uma proposta de desenvolvimento de uma tecnologia de fabricação por camadas que tem um grande potencial na construção automatizada de toda a estrutura. Uma simples casa, ou uma colônia de casas, com a possibilidade de diferentes configurações, podem ser automaticamente construídas incluindo instalações elétricas, hidráulicas e ar condicionado, permitindo que arquitetos projetem estruturas com geometrias complexas e difíceis de executar (KHOSHNEVIS, 2004).

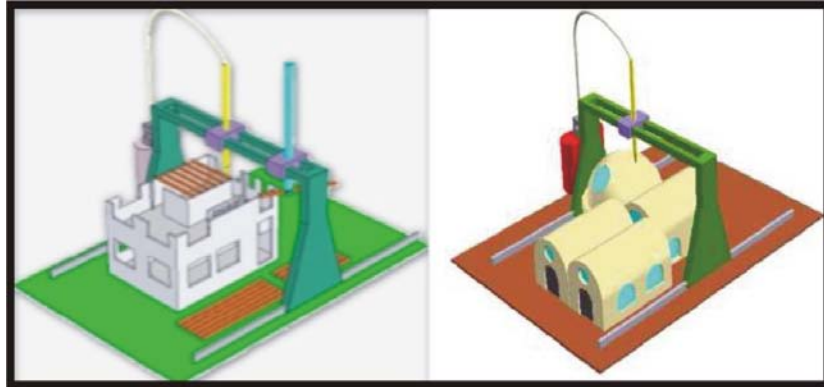


Figura 2.19: Opções de processo Contour Crafting (KHOSHNEVIS, 2004)
 Fonte: <http://www.contourcrafting.org>

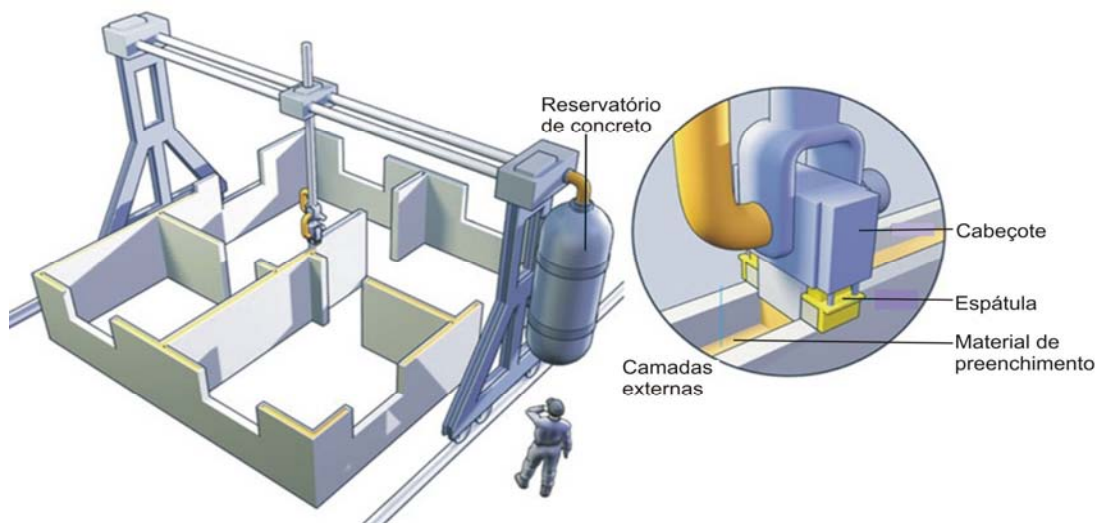


Figura 2.20: Processo de construção "Contour Crafting"
 Fonte: Adaptação de <http://www.contourcrafting.org>

Outra aplicação nessa área é a utilização de um robô industrial (Figura 2.21), pesquisado na faculdade de arquitetura da *Swiss Federal Institute of Technology Zurich* - ETHZ⁵, em Zurique, na Suíça, que tem como objetivo examinar as emergentes condições da produção automatizada. Com um eixo linear de sete metros de comprimento e alcance do braço móvel de até três metros, o robô tem condições de montar partes de edifícios geradas por algoritmos e controladas diretamente pelos dados criados previamente no projeto, em escala real 1:1. Além disso, trabalha com diferentes ferramentas de acordo com tarefas diferenciadas e específicas. Nesse caso,

⁵

ETHZ: <http://www.arch.ethz.ch/darch/index.php?lang=en>

a transição de utilização das máquinas CNC de produção de partes para as de montagem pode oferecer novos cenários para os materiais tradicionais.



Figura 2.21: Robô industrial da ETHZ – Departamento de arquitetura
Fonte: http://www.dfab.arch.ethz.ch/?lang=e&loc=AF&this_page=infrastructure

A construção de fôrmas para a produção de peças e elementos construtivos a serem instalados diretamente na obra é considerada uma finalidade indireta. Suas utilizações podem ser divididas como produções: (1) em série, (2) de uma peça única e (3) de uma pequena série. A produção em série pode ser ilustrada na fabricação de telhas, onde a prototipagem rápida combinada com o uso de *software* CAD/CAM são particularmente importantes para o controle de aspectos como conexões e visualizações das peças. A figura 2.22 mostra uma telha desenvolvida digitalmente e prototipada com uma possível aplicação real.

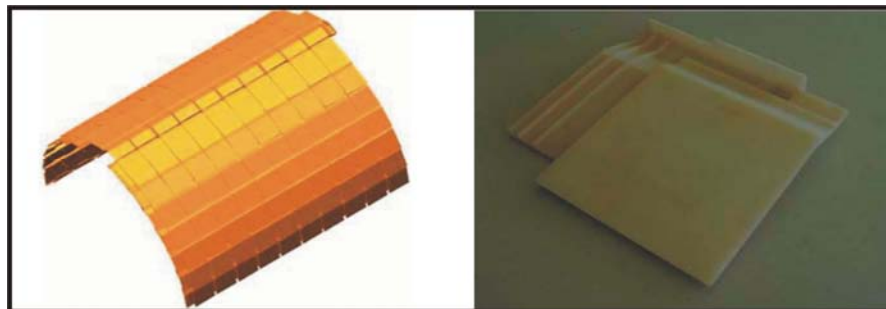


Figura 2.22: Telha prototipada e exemplo de aplicação
Fonte: Duarte e Caldas (2005)

Na produção de peças únicas, as técnicas podem ser exemplificadas na construção de painéis (Figura 2.23) de uma experiência de avaliação acústica em um projeto de pesquisa interdisciplinar, de Ralph Bärtschi, do departamento de arquitetura e fabricação digital da ETHZ. A fabricação em escala 1:1 desses painéis, com material específico, foi importante para a viabilidade do projeto, pois envolveu uma extensa pesquisa de materiais, com propriedades espaciais, estéticas e acústicas diferenciadas. As propriedades acústicas dos painéis puderam ser mensuradas e avaliadas *in loco* ao final do experimento, ocorrido em 2007.



Figura 2.23: Painéis acústicos únicos

Fonte: http://www.dfab.arch.ethz.ch/?lang=e&loc=AF&this_page=forschung&this_id=85

Concluindo o método de produção de fôrmas, a produção de peças em pequena série pode ser exemplificada no caso da Igreja da Sagrada Família, projeto de Antonio Gaudi (1852-1926), em Barcelona, Espanha, cujas obras foram iniciadas em 1882 e nunca terminadas. As próteses arquitetônicas, nesse caso, são usadas para repor peças que foram danificadas ao longo do tempo ou como finalização da obra, preservando todas as características e proporções do projeto original inacabado (Figura 2.24). Esse caso específico será analisado mais adiante, no item 5.1.2., nessa tese.



Figura 2.24: Produção em pequena série para a Igreja Sagrada Família, Barcelona
Fotos: Gabriela Celani, 2008

Quanto ao número de dimensões

Quanto ao número de dimensões na produção automatizada, as formas de produção são ilustradas na figura 2.25. Esses sistemas são produzidos tipicamente em duas dimensões (2D), em duas dimensões e meia (2.5D) e em três dimensões (3D), descritas a seguir.

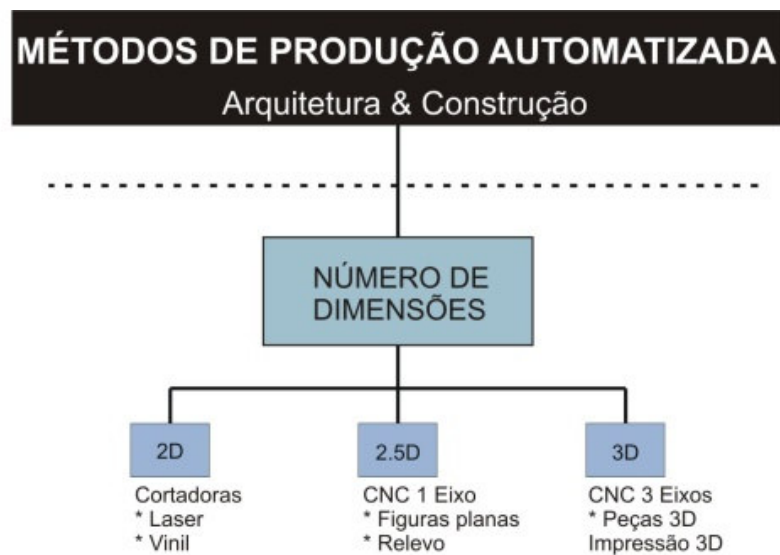


Figura 2.25: Método de produção automatizada para Arquitetura e Construção por número de dimensões

Os sistemas que produzem objetos em duas dimensões (2D) são compostos pelas cortadoras que simplesmente cortam placas de diversos materiais e espessuras. Dois exemplos de sistema de duas dimensões são as cortadoras de vinil (Figura 2.26), que cortam apenas papel ou outros materiais maleáveis e finos, e as cortadoras a laser (Figura 2.27), que trabalham com uma variedade maior de materiais (MDF, acrílico, cortiça, papelão, etc.), em espessuras maiores.

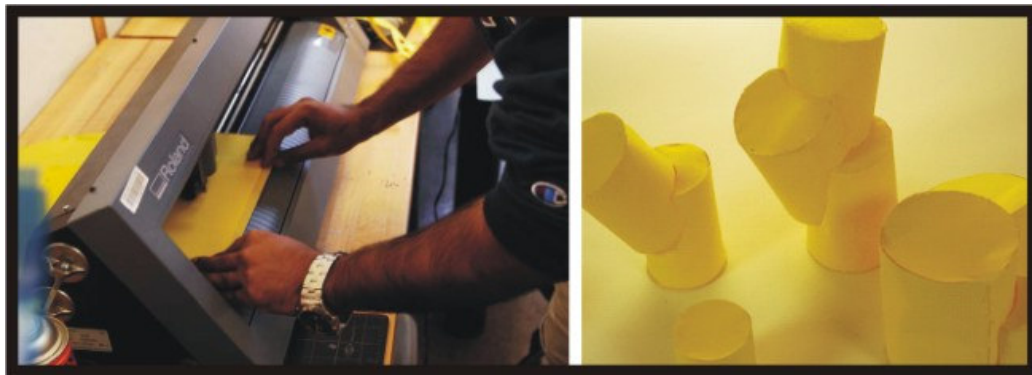


Figura 2.26: Uso da cortadora Vinil, DIGITALDESIGNFABRICATION GROUP, 2006
Fonte: <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Architecture/4-510Fall-2005/CourseHome/index.htm>



Figura 2.27: Trabalho em cortadora a laser
Fonte: Vieira (2007)

O processo que caracteriza o método de produção em duas dimensões e meia (2.5 D) trabalha com uma fresa de controle numérico com um *spindle* (eixo) que pode “esculpir” figuras planas e executar relevos (Figura 2.28), porém não é capaz de produzir modelos tridimensionais complexos.



Figura 2.28: Método de produção em duas dimensões e meia (2.5 D)
Fotos: Regiane Pupo

Já as fresas de três, quatro ou cinco eixos ou um sistema de impressão 3D são considerados efetivamente métodos tridimensionais. Esses equipamentos podem produzir, em alguns casos, protótipos ou peças em escala real 1:1, em três dimensões, sem a necessidade de montagem. A figura 2.29 mostra a produção de uma peça em escala real 1:1, com a utilização de uma fresa de cinco eixos e a figura 2.30 ilustra um modelo 3D, em escala reduzida, produzido em sistema de impressão 3D, por sobreposição de camadas, discutido no item 2.2.1.

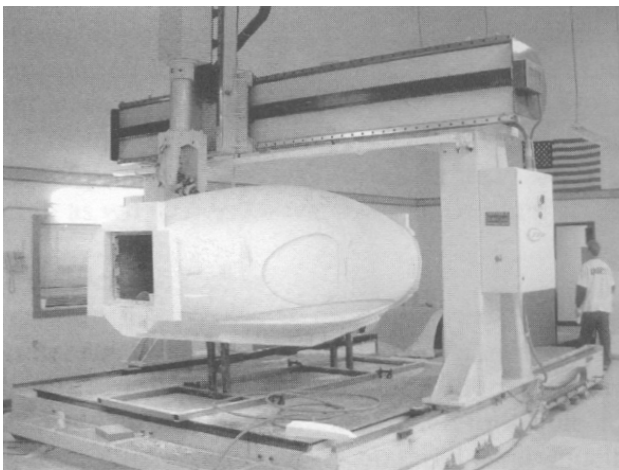


Figura 2.29: Produção direta 3D, em escala real, em equipamento de cinco eixos
Fonte: Schodek (2005)



Figura 2.30: Produção direta 3D, de maquete, em equipamento Stratasys ProdigyPlus
IST – Instituto Superior Técnico de Lisboa
Foto: Regiane Pupo (2007)

Quanto a maneira que os objetos são produzidos

Existem três maneiras nas quais os objetos podem ser produzidos com a produção automatizada, que são os processos subtrativo, formativo e aditivo. Cada uma com suas propriedades e características, como demonstradas na figura 2.31 e descritas a seguir.

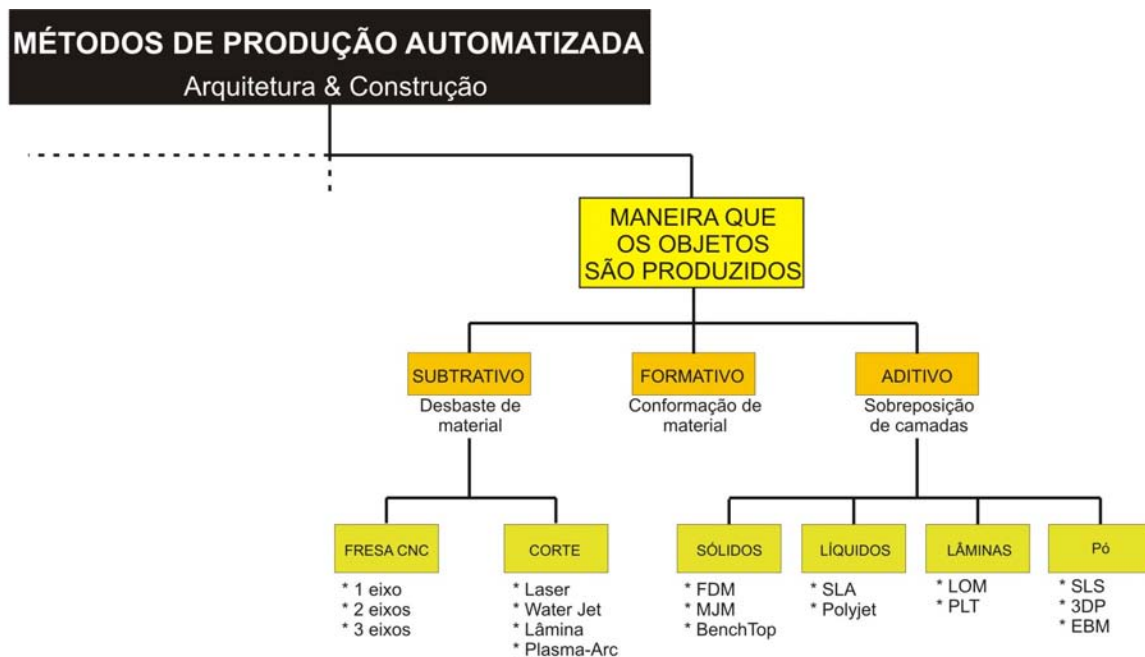


Figura 2.31: Métodos de produção automatizada para Arquitetura e Construção pela maneira que os objetos são produzidos

O sistema subtrativo é caracterizado pelo desbaste de material, até que a peça desejada seja produzida. Uma grande vantagem na utilização destas técnicas é que uma variedade de materiais pode ser utilizada em sua forma natural, como é o caso da madeira e poliuretano. Esse método é dividido em dois tipos: (1) por fresas do tipo CNC e (2) por corte. No primeiro, o bloco de material é desbastado seletivamente por fresas que se movem automaticamente em diversas direções, determinadas por eixos, ou ainda com o auxílio de mais um eixo rotatório que movimenta o bloco para diminuir a

necessidade de deslocamento da fresa. A figura 2.32 mostra dois tipos de fresadoras: a imagem da esquerda com uma fresa de um eixo e a da direita com mais eixos, com braço articulado facilitando o desbaste de material.



Figura 2.32: Desbaste de material em uma direção (esquerda) e em vários eixos (direita)
Fonte: Pottmann et al (2007 p. 588)

A figura 2.33 ilustra as fresas de três, quatro, cinco e seis eixos, demonstrando que o grau de complexidade geométrica alcançado aumenta de acordo com os recursos que o equipamento possui. Mesmo assim, um modelo pode não ser produzido de uma só vez, ou por ser maior que a plataforma da máquina ou pela sua geometria complexa. Nesses casos, é comum a decomposição do modelo, em partes, para posterior montagem. Mesmo em modelos pequenos, algumas superfícies internas são inatingíveis sem uma eventual divisão da geometria. Segundo Schodek (2005, p. 259), quanto maior o número de eixos controlados, maior a complexidade do trabalho que pode ser produzido, acompanhada dos desafios da programação dos computadores. Esse sistema de produção também é muito utilizado em indústrias de ferramentaria, permitindo a produção precisa de moldes e peças usinadas a partir de blocos de metal.

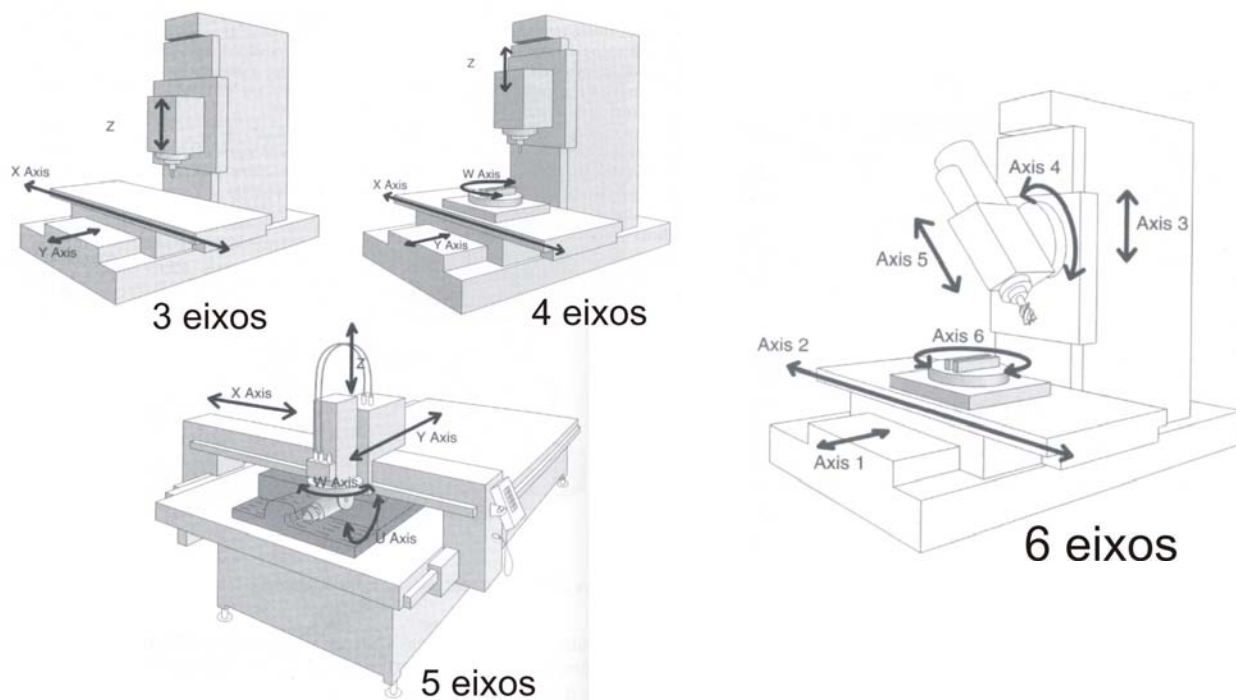


Figura 2.33: Fresas de 3 a 6 eixos
 Fonte: Schodek (2005, p. 242/260)

Ainda no sistema subtrativo, o material pode ser removido por corte, utilizando tecnologias como as cortadoras a laser, as de jato d água (*Water Jet*), as de corte de lâminas e a *Plasma-arc*. Caracterizam-se pelos movimentos bidimensionais do eixo de corte e sua aplicação depende do material a ser utilizado. Existem grandes diferenças entre estas tecnologias devido ao material e espessuras utilizadas em cada uma. A cortadora a laser, a mais comum entre todas, é equipada com um conjunto de espelhos que direciona o feixe de laser no material a ser cortado. O calor do feixe queima o material, cortando-o ou deixando uma marca ou vinco, cuja profundidade varia de acordo com a espessura do material e a potência pré-ajustada do laser (POTTMANN et al, 2008, p. 582). As figuras 2.34 e 2.35 ilustram dois trabalhos produzidos em cortadora laser. É importante salientar que esse tipo de equipamento somente corta ou vinca as peças 2D, com incrível rapidez e extrema precisão, as quais são posteriormente montadas para a obtenção do volume pretendido.



Figura 2.34: Maquete produzida em cortadora laser em MDF e balsa. IST- Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2007

Alunos: António Góis e José Borges
Foto: Regiane Pupo



Figura 2.35: Maquete produzida em cortadora laser em papelão ondulado. FEC- Unicamp, 2008

Aluna: Maria Julia Mazetto
Foto: Regiane Pupo

Nas cortadoras de jato de água (*Water Jet*), como o nome sugere, um jato de água de alta pressão se mistura com partículas abrasivas sólidas e é transportada por um pequeno orifício (*nozzle*) em um canal muito bem focalizado, causando rápida e certa erosão no material posicionado na plataforma, causando cortes limpos e precisos (Figura 2.36). Diversos materiais podem ser cortados nesse tipo de cortadora, dentre eles, madeira, plástico, metal, pedra, cerâmica, vidro e materiais compostos. Segundo Schodek (2005, p. 263), a grande vantagem das cortadoras de jato de água é o efeito de resfriamento da corrente de água, que permite que qualquer material sensível ao calor seja cortado com o mínimo de estresse. As vantagens ainda incluem alta velocidade de corte e a possibilidade de se fazer cortes no meio da peça (como a cortadora laser) e ainda a eliminação de fixação da peça na máquina. As figuras 2.37 e 2.38 mostram duas peças cortadas com tecnologia jato de água, em polycarbonato e metal, respectivamente. Enquanto a cortadora laser corta materiais com até 16 mm de espessura, as de jato de água têm capacidade de corte, por exemplo, de uma placa de titânio de 38 cm de espessura (KOLAREVIC, 2003, p. 34)

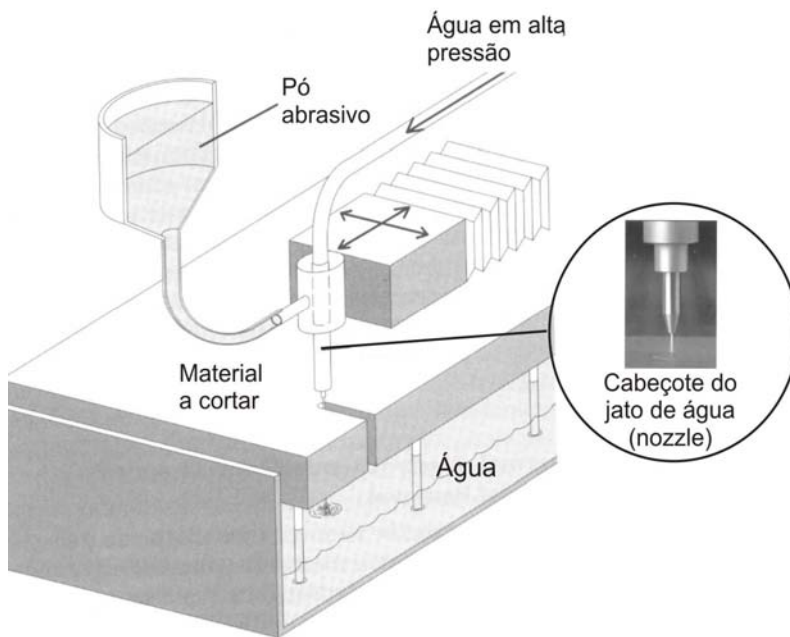


Figura 2.36: Cortadora a Jato de água com detalhe do nozzle
 Fonte: Schodek (2005, p. 263) e Kolarevic (2003, pp. 34)

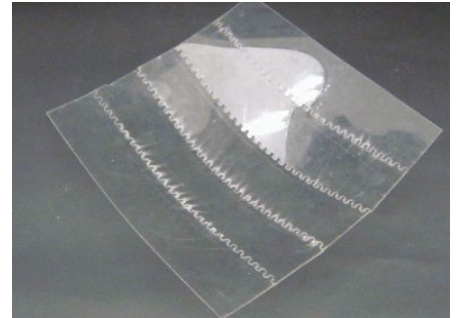


Figura 2.37: Exemplo de objeto de policarbonato cortado com cortadora a jato de água
 Fonte: Vieira (2007, p. 39)



Figura 2.38: Exemplo de objeto metálico cortado com a cortadora a jato de água
 Fonte: Vieira (2007, p. 39)

Já a cortadora *Plasma-arc* utiliza um arco elétrico e gás comprimido atingindo uma temperatura de quase 14.000 graus Celsius no momento do corte, possibilitando o uso de placas de aço mais grossas (Figura 2.39).

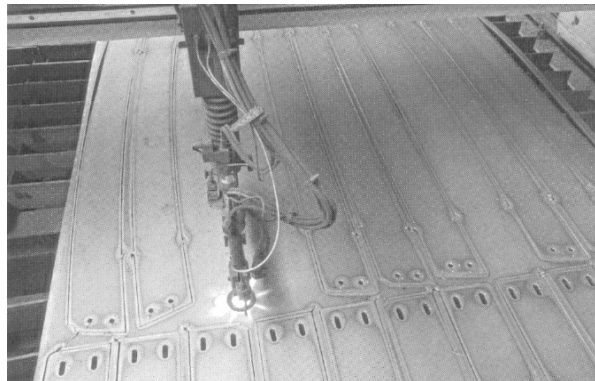


Figura 2.39: Cortadora *Plasma-Arc*
 Fonte: Kolaveric (2003, pp.34)

O sistema formativo assemelha-se a um molde versátil, com a capacidade de se adaptar a diferentes formas. Um exemplo desse sistema são os moldes adaptáveis para a produção de placas de vidro com curvaturas especiais (Figura 2.40). Esses moldes podem ser produzidos, por exemplo, com um sistema de pinos de alturas reguláveis, que são posicionados automaticamente a partir de informações obtidas do modelo digital da superfície que se pretende reproduzir. Após o ajuste dos pinos, uma placa plana de vidro é colocada sobre o molde e levada a um forno, onde ela amolece e assume a configuração da base de pinos.



Figura 2.40: Sistema formativo - Vidro com curvaturas especiais

Fonte: MIT open courseware (<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Architecture/4-212Spring2003/CourseHome/index.htm>)

Outro exemplo são os equipamentos que permitem dobrar e encurvar chapas de aço (*metal bending*) e tubos metálicos (*tube bending*) por aquecimento, a partir de um modelo digital, como aplicado no projeto do BMW Pavilion, em Frankfurt, Alemanha, de Bernhard Franken, em 2000 (Figura 2.41).



Figura 2.41: Sistema formativo – BMW Pavillion, B. Franken, 2000
Fonte: Kolarevic (2005, p. 38-134)

Finalmente, o sistema aditivo consiste na sobreposição de camadas de material, sucessivamente, até que o objeto tridimensional seja formado (Volpato et al, 2007). Geralmente, cada equipamento, de diferentes fabricantes e com a possibilidade de utilização de diversos materiais, possui seus próprios aplicativos, que basicamente têm a capacidade de ler os arquivos digitais 3D já elaborados por um programa CAD e enviá-los para a máquina de impressão. Para isso o *software* cria fatias horizontais do modelo digital, que são enviadas uma a uma para a máquina, solidificadas, ou cortadas e coladas umas sobre as outras. Os sistemas aditivos podem ser subdivididos de acordo com o tipo de material que utilizam antes de seu processamento: (1) Sólidos, (2) Líquidos, (3) Pó ou (4) Lâminas. Cada uma dessas tecnologias será descrita no item 2.2.1, mais à frente, em que as técnicas de prototipagem rápida serão discutidas.

2.2. A Prototipagem Digital

O termo “projeto digital” (em inglês *digital design*) tem recebido vários significados e definições. Segundo Sass e Oxman (2006, p. 333), “frequentemente, o termo, em arquitetura, tem sido associado à representação e manipulação de formas e espaços complexos. Entretanto, a idéia de processos de projetos digitais integrados, diferentemente de projetos elaborados em papel, sugere que todo o processo tenha sido exclusivamente elaborado em ambiente computacional”. Logo, é necessário

localizar onde e como se insere a prototipagem digital ao longo do processo e como ela se relaciona com todas as novas formas de produzir arquitetura. Como anteriormente definido no item 1.2., a prototipagem digital inclui a prototipagem rápida (sistemas aditivos), as cortadoras a laser e as fresadoras, todas discutidas a seguir.

2.2.1. A prototipagem rápida

Segundo Wolhers (2008), a primeira tentativa em criar objetos sólidos utilizando fotopolímeros e raio laser se deu no final da década de 60 no Instituto Battelle Memorial, em Ohio, nos Estados Unidos, que prima, até hoje, pela pesquisa e desenvolvimento de experiências na área da ciência dos materiais. A experiência pioneira envolveu a intersecção de dois feixes de laser com diferentes intensidades de onda em um tanque de resina, com a intenção de solidificar o material no momento da intersecção. A resina de fotopolímero utilizada no processo foi criada pela empresa DuPont, nos anos 50. A partir daí, muitas experiências, patentes e pesquisas acadêmicas tornaram-se importantes para o desenvolvimento de tecnologias atuantes em diversas áreas em que a tridimensionalidade e a análise física são fundamentais para a conceituação, análise e produção limitada de produtos. Na área da arquitetura, a prototipagem rápida foi formalmente introduzida em 1991 por Streich (SASS e OXMAN, 2006, p. 331), como um método de transformação de modelos CAD tridimensionais em modelos prototipados rapidamente, em particular com técnicas de estereolitografia (processo baseado em líquidos discutido na página 68). Ainda segundo Sass e Oxman (SASS e OXMAN, 2006), mais tarde, Simondetti, em 2002, apresentava os métodos de prototipagem rápida e CAD/CAM para a fabricação de objetos 3D em escalas reduzidas e real, incluindo diversas técnicas em pesquisa na arquitetura.

Por ser uma tecnologia relativamente nova e em vista dos inúmeros processos de produção até hoje utilizados, existem diversas explicações a respeito das definições da prototipagem rápida (PR). Segundo Buswell et al (2007), o termo prototipagem rápida (*rapid prototyping*) refere-se normalmente aos métodos de produção de protótipos por sistemas aditivos. Ou seja, o processo de fabricação é feito por meio de adição de material, camada por camada, permitindo a produção de protótipos ou modelos em três dimensões a partir de modelos geométricos gerados em sistemas CAD. A PR é uma ferramenta poderosa para reduzir o tempo de produção enquanto aumenta a qualidade e reduz custos. Contudo, enquanto algumas teorias revelam a PR como sendo unicamente os processos que se utilizam da sobreposição de camadas de qualquer material visando a formação de um protótipo físico, outras não estabelecem parâmetros e a definem pela utilização de equipamentos que não necessitem da força humana.

Na verdade, apesar das controvérsias estabelecidas quanto à utilização da PR em suas diversas aplicações, a clareza na definição do termo pode se dar no simples entendimento de que “a prototipagem rápida é o nome mais comum dado às tecnologias correlatas que são usadas para fabricar objetos físicos diretamente de um arquivo digital tridimensional produzido em CAD” (Saura, 2003). São métodos desenvolvidos originalmente para a produção de modelos prototipados, rapidamente. O termo “rápido” faz referência ao fato desses sistemas não requererem nenhum tipo de assistência humana durante sua produção e ainda, com o avanço da tecnologia e as inúmeras opções de uso de equipamentos e *software*, o termo varia muito entre as tecnologias disponíveis. A construção de um protótipo ou modelo por intermédio desses processos pode levar de 2 a 72 horas para serem construídos, dependendo do tipo de geometria e equipamento utilizado. Parece muito, mas se comparado aos métodos tradicionais de produção, garantem seu sucesso em termos de tempo de produção, precisão e ainda com a possibilidade de serem utilizados como protótipos.

Embora já bem estabelecidas nas áreas de manufatura e mais recentemente na área médica, as aplicações da PR na arquitetura e construção são ainda incipientes. Segundo Wohlers (2007), a inclusão da área de arquitetura dentre os diversos campos de aplicação de equipamentos de prototipagem rápida começou a aparecer muito timidamente em 2005, com relevante aumento em 2006. Em pesquisas conduzidas anualmente pela Wohlers Associates, Inc., com sede nos Estados Unidos, alguns dados quantitativos podem ilustrar o panorama da utilização das tecnologias da prototipagem rápida hoje. Os dados contidos no guia Wohlers referem-se sempre ao ano anterior à sua publicação. O gráfico 2.1 identifica, no círculo interno, nove categorias de uso de PR percentualmente quantificadas, em 2006, enquanto que o círculo externo representa as mesmas categorias no ano de 2007. Pode-se notar que em comparação com campos como a indústria automotiva, a de produtos de consumo e a área médica, a utilização na área de arquitetura ainda é muito pequena. Em 2006, enquanto a área de produtos de consumo e eletrônicos utilizava 23.7% do mercado de equipamentos de prototipagem, a área da arquitetura movia somente 4.6%. Mesmo com uma grande diferença, esse índice é considerado um sucesso, visto que em anos anteriores as aplicações em arquitetura ainda se inseriam na fatia “outros”, juntamente com diversas outras aplicações.

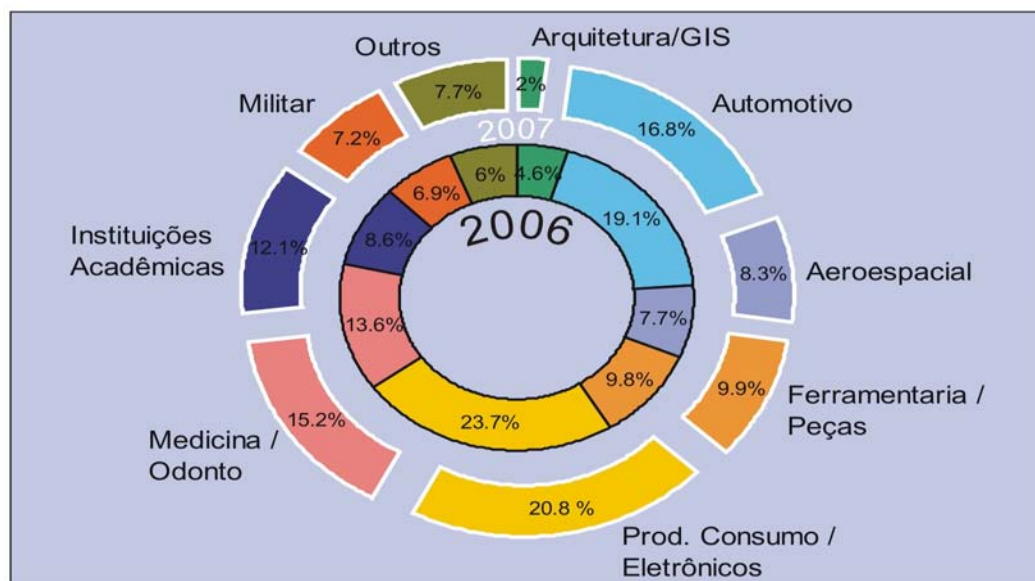


Gráfico 2.1: Comparação da aplicação da prototipagem rápida entre 2006 e 2007
Fonte: Dados Wohlers Associates (2007 e 2008)

Ainda segundo Wohlers (2008, p. 23), a última pesquisa envolveu 84 empresas, entre fabricantes e prestadores de serviços nas áreas de PR, com um total estimado entre 5.000 a 7.000 pessoas. As duas edições anteriores, 2007 e 2006, envolveram 85 e 80 empresas, respectivamente. A pesquisa envolveu fabricantes dos Estados Unidos, Alemanha, Japão, Suécia, China, Canadá, França, Israel e Coreia e prestadores de serviços dos Estados Unidos, Alemanha, Austrália, Bélgica, Índia, Itália, Turquia, Canadá, Japão, Nova Zelândia, Suécia, África do Sul, Tailândia e Brasil. Os resultados foram obtidos pela indicação de cada empresa entrevistada de acordo com o tipo de clientes que atendem. A área de produtos de consumo e eletrônicos lidera a pesquisa, e, segundo o guia, isso vem acontecendo nos últimos três anos, embora com pequeno declínio nas duas últimas edições. Mas, ainda de acordo com a pesquisa, a área onde a PR é mais utilizada é a implantação em instituições acadêmicas, independente da área de estudo. Fator muito importante e imprescindível para o aumento e continuidade da investigação em todos os setores, trazendo inovações tecnológicas e novas aplicações. As demais áreas demonstram alguma instabilidade percentual, mas ainda assim seguem em expansão, em números totais. Quanto à área de arquitetura, pode-se observar uma redução entre 2006 e 2007, possivelmente pelo vasto uso que vem sendo dado em suas aplicações, muitas vezes inseridas na fatia que inclui outras aplicações.

Dentre os métodos de produção automatizada, como já visto, a maneira aditiva de produzir objetos prototipados, ou seja, aqueles construídos camada por camada são os mais populares. As opções de uso dessa tecnologia incluem modelos funcionais, de apresentação, de visualização, montagem, moldes para ferramentaria e manufatura rápida direta. O gráfico 2.2 ilustra resultados da pesquisa Wohlers (2008) em que demonstra, por exemplo, os modelos de apresentação, com 13.7%, os de visualização, com 15.3% e os modelos funcionais, com 19.1%, são os usos mais comuns entre as aplicações para a arquitetura. A manufatura rápida direta aparece com 14.9% de utilização, sendo a aplicação que mais cresceu no mercado mundial, atingindo rapidamente a terceira aplicação mais comum, em seis anos de atuação.

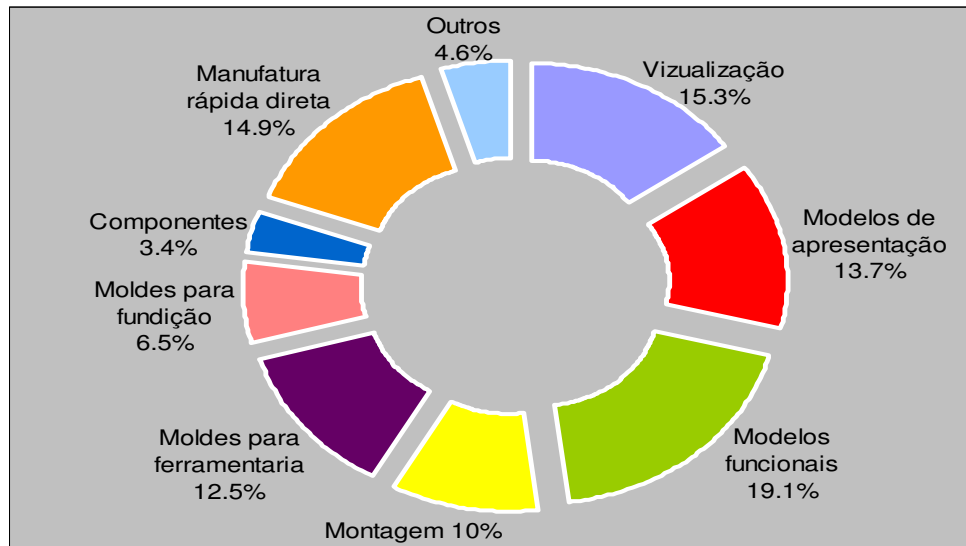


Gráfico 2.2: Aplicações de processo aditivo
Fonte: Dados Wohlers Report (2008)

Situando o Brasil dentro do contexto mundial quanto ao uso de processos aditivos de prototipagem rápida, a pesquisa (Wholers, 2008) também demonstrou que desde 1996, quando esta tecnologia começou a ser comercializada, 26.847 unidades foram instaladas em diversos países do mundo. Os Estados Unidos lideram com 10.585 máquinas instaladas e um crescimento apontado de 12.3% nos últimos dois anos (2006 e 2007). Curiosamente, neste mesmo período, a China cresceu somente 2.7% e a Rússia 271.8% em equipamentos instalados. No Brasil, desde 1996, foram instalados 109 equipametos de prototipagem rápida e em 2006 e 2007, respectivamente, 19 e 23 equipamentos foram instalados, demonstrando um crescimento de 21.05 %.

Segundo Buswell (2006), em termos gerais, todos os processos de prototipagem rápida são capazes de produzir componentes pela adição ou construção de material para formar um objeto. Como já mencionado, desde suas primeiras aplicações, o termo Prototipagem Rápida, associa a economia de tempo à negação da mão-de-obra humana ou de qualquer ferramenta empregada para criar um objeto como parte do processo de projeto. Buswell (2006) a denomina Manufatura Rápida quando a Prototipagem Rápida se aplica na produção final de peças (*end use parts*), e não

necessariamente se preocupa com a rapidez com que o objeto é produzido, como induz a expressão. A obtenção de peças finais deve ser garantida pela diversidade e aplicabilidade dos materiais empregados, e graças ao desenvolvimento e evolução de pesquisas de materiais, os resultados têm sido de soluções verdadeiramente funcionais. Hoje é possível se obter peças finais fabricadas com pó de metal, titânio, cobalto e cromo, dentre outras, e acabamentos em cobre, níquel ou materiais condutivos. A mais impressionante característica no uso dessas novas tecnologias é, indiscutivelmente, a possibilidade de produção restrita. Não há mais a necessidade de se produzir peças em grande escala, em série, mas sim, personalizadas para serem testadas ou terem um uso final.

Após a decisão de tirar vantagens dos benefícios da PR, o desafio passa a ser a escolha do equipamento certo para cada tarefa. Essa escolha entre os diversos processos de PR hoje disponíveis no mercado fica mais difícil à medida que os fabricantes estão cada vez mais investindo nos processos. É preciso um entendimento minucioso sobre os limites, as capacidades e as possibilidades de cada aplicação específica. De acordo com Volpato et al (2007, p. 102), como as tecnologias de PR baseiam-se no princípio de adição de materiais camada a camada, o processo básico a ser seguido é semelhante para todos os processos, se resumindo em quatro etapas básicas: 1) o desenho no CAD; 2) o planejamento da impressão 3D; 3) a fabricação e 4) o acabamento, como sintetizado na figura 2.42. As etapas sempre são as mesmas, o que varia são os materiais utilizados, os tempos de impressão e de acabamento e o procedimento de acabamento. O processo inicia-se com um modelo digital 3D, o qual pode ser criado em qualquer sistema CAD ou ser obtido por meio de digitalização tridimensional do objeto a ser prototipado. Em alguns casos, como no desenvolvimento de projetos com formas livres ou na produção de próteses arquitetônicas, a produção de protótipos e maquetes envolverá não apenas as técnicas de *output* dos modelos digitais, mas também técnicas de *input*, como o processo de digitalização 3D por digitalizador a laser ou de outros tipos, como discutidos no item 2.1.1. Este arquivo deve ser exportado para o formato STL (*Stereolithography*) para que possa ser

interpretado pelo sistema do equipamento de impressão. A seguir, é iniciada a etapa de planejamento de impressão executada pelo *software* do equipamento de prototipagem a ser utilizado. Como exemplos, os equipamentos da Stratasys utilizam o *software* Insight e os da Zcorp utilizam o Zprint, ambos desenvolvidos pelos próprios fabricantes. Nessa etapa, o *software* tem a função de: (1) verificar a integridade do arquivo STL enviado, (2) definir os suportes para peças em balanço (no caso do processo FDM), (3) definir parâmetros como escala, tempo de execução, posição e orientação do objeto e (4) “fatiar” o objeto em camadas para que possa ser enviado à fase seguinte, a de fabricação. Cada sistema procede de sua maneira específica para solidificar o objeto, camada a camada. Completando o processo, a última etapa, a de acabamento, pode ser iniciada. Algumas tecnologias requerem o polimento ou lixamento da peça, enquanto outras necessitam de uma resinagem ou uma pintura.

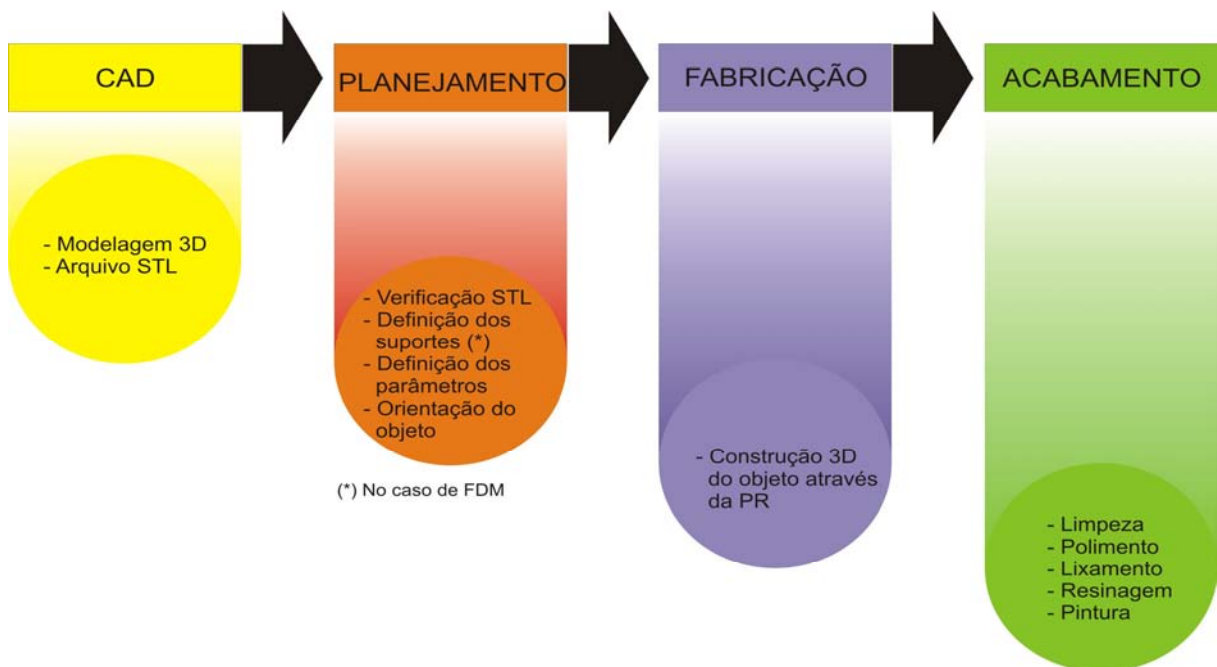


Figura 2.42: Etapas gerais do processo de Prototipagem Rápida
Fonte: Adaptação de Silva (2008)

Os métodos de prototipagem rápida têm estabelecido enorme impacto no desenvolvimento de produtos e maquetes, conquistando a atenção de empresários do

ramo da construção, investidores, agências governamentais, pesquisadores, entre outros. Segundo Wohlers (2008, p. 39), algumas estimativas proporcionam uma análise do passado, não tão distante, e algumas previsões para o futuro:

- Nos últimos quatro anos (2004-2007), produtos e serviços derivados da PR cresceram mundialmente em média 612 milhões de dólares. A indústria cresceu 116% durante este período;
- A média de crescimento de venda de impressoras 3D entre 1996 e 2007 foi de 40.4%;
- Quase 58% dos equipamentos vendidos pela Stratasys e ZCorp (juntas) foram efetuados nos últimos seis meses.
- A venda de impressoras 3D nos últimos quatro anos (2004-2007) representa aproximadamente 72% do total de sistemas aditivos instalados durante este período.
- Os sistemas aditivos foram comercializados em 67 países em 2007, com estimativa de 71% de estes terem sido instalados nos seis primeiros países na classificação.

Os números podem impressionar, mas ainda há muito que se fazer, especialmente se considerado o papel que a manufatura aditiva pode exercer na manufatura direta. A produção de partes finais parece ser muito mais desafiadora do que a construção de modelos prototipados, mas é uma aplicação que requer tempo e pesquisas para seu desenvolvimento. Wohlers (2008) prevê a manufatura rápida como uma das maiores aplicações da tecnologia por adição num futuro muito próximo. A figura 2.43 identifica os limites dimensionais atuais e futuros da Prototipagem Rápida. A forma mais comum de produção automatizada, hoje, encontra-se em dimensões reduzidas a escalas “meso” que podem ser manipuladas com muita facilidade e representam perfeitamente o conceito, o processo, a espacialidade, ou qualquer variável que se possa manipular. A escala “macro” destina-se à produção de edifícios inteiros, como é o exemplo do sistema *Contour Crafting* e de robôs que produzem

espaços (ambos já citados respectivamente nas páginas 51 e 52), em processos ainda em fase de pesquisas e longe de escritórios e construtoras.

Com tecnologia que proporciona a produção de objetos prototipados em escala “micro”, pode-se produzir elementos em processos baseados em líquidos ou pó, para a micro-mecânica de alta precisão e detalhamento. Esta escala já começou a direcionar cientistas e pesquisadores na aplicação da prototipagem rápida em nanotecnologia, ciência associada a diversas áreas, como a medicina, eletrônica, ciência da computação, física, química, biologia e engenharia dos materiais, de pesquisa e produção na escala “nano”, a também chamada escala atômica⁶. As aplicações variam entre as micro-fluídicas, micro-ópticas e moléculas de cristal líquido (Silva, 2008).

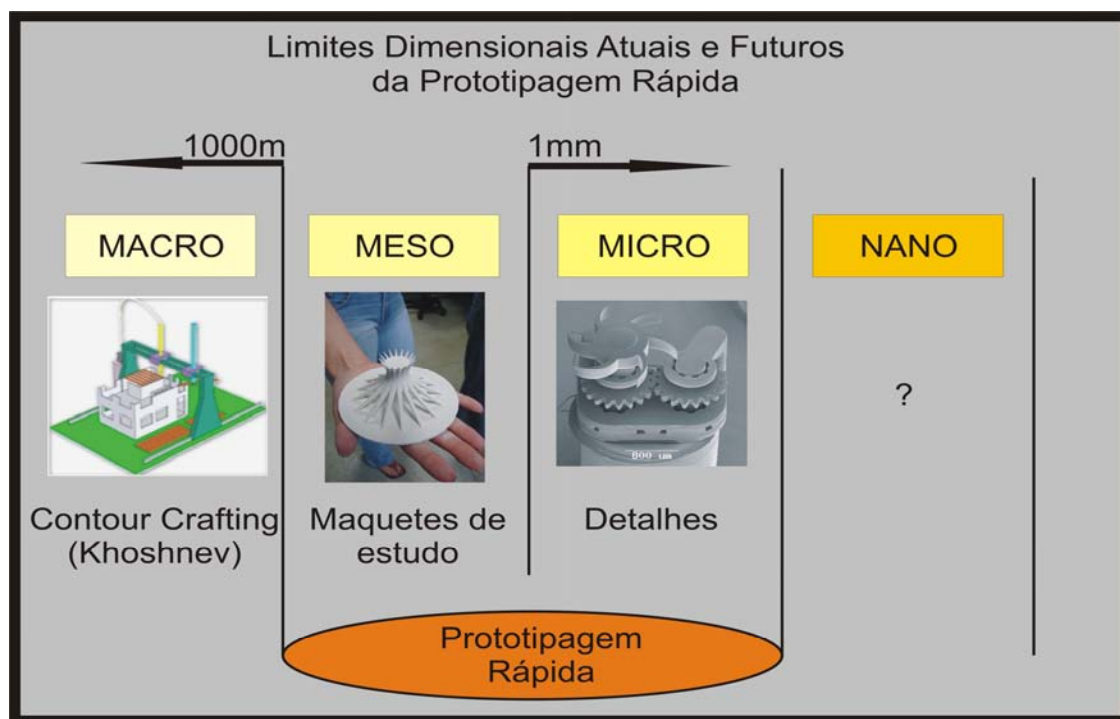


Figura 2.43: Limites dimensionais atuais e futuros da prototipagem rápida
Fonte: Adaptação de Silva (2008)

⁶

Escala Atômica: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Nanotecnologia>

Os birôs de prototipagem rápida são uma prática muito interessante que vem se tornando muito comum nos Estados Unidos, Europa e Ásia. Estes podem ser a saída para o adiamento de investimentos geralmente muito altos em equipamentos e *software* em escritórios de firmas de arquitetura. Estas empresas oferecem os serviços de prototipagem 3D em diversas tecnologias, espelhando-se nos birôs de plotagem, hoje muito comuns. Seu funcionamento é rápido e eficiente, iniciando com o envio de arquivos de modelos geométricos digitais, pelo cliente, que são impressos em impressoras 3D e enviados ao cliente pelo correio. Essa prática iniciou com serviços especializados em engenharia e depois em aplicações médicas, mas hoje em dia já se encontram empresas que fabricam protótipos para todos os fins. Exemplos de empresas no exterior que prestam esse tipo de serviço são (1) a Materialise On Site Prototypes⁷ em Londres, Inglaterra e (2) a Arptech – Prototyping Services⁸ na Austrália, onde é possível enviar um arquivo digital e retirar a peça pronta, em 3D, no dia seguinte. Já no Brasil, a empresa ARTIS Prototipagem⁹ especializou-se na área médica em aplicações como reconstruções maxilares e mandibulares, ortopedia e neurologia, entre outras. A Seacam¹⁰, além de representante para a venda de máquinas e suprimentos, também atua no ramo de prestação de serviços de impressão 3D de peças de qualquer natureza. A RobTec¹¹, um dos maiores birôs nacionais, desde 1994 atua nos mercados do Brasil e da América Latina com tecnologias de prototipagem rápida, com serviços que vão desde o desenvolvimento de um produto até a sua fabricação, passando pelas etapas de desenho, produção de um protótipo, ferramental rápido (*Rapid Tooling*), engenharia e controle dimensional. Além dos serviços, a Robtec também comercializa equipamentos e softwares das empresas que representa. Algumas outras empresas de pequeno porte prestam esse tipo de serviço, contudo, não existe no Brasil nenhuma empresa que desenvolva e implemente o processo de fabricação digital como um todo desde o projeto de arquitetura até a construção civil, a

⁷ Materialise - <http://www.materialise.be>
⁸ ARPTECH - <http://www.arptech.com.au/>
⁹ ARTIS - <http://www.artis.com.br/>
¹⁰ SEACAM - <http://www.seacam.com/>
¹¹ RobTec - <http://www.robtec.com/index.htm>

exemplo o CTI - Centro de Pesquisas Renato Archer, que atua na área médica. O CTI¹² é um instituto do Ministério da Ciência e Tecnologia localizado em Campinas (SP), que, desde 1997, desenvolve trabalhos na área de prototipagem rápida para o desenvolvimento de aplicativos, metodologias e ferramentas para aplicação no planejamento cirúrgico.

Como visto, atualmente, o mercado mundial na área de prototipagem rápida está munido de inúmeras técnicas, equipamentos, com uma variedade de materiais, para uma diversidade de aplicações que vão desde investimentos na área médica e odontológica até a aeroespacial. Dentro deste espectro de aplicações, o foco deste trabalho é a utilização da PR para arquitetura e construção é abordada nesta pesquisa, estreitando e direcionando seu uso para esta área. Diversas outras aplicações, que não são diretamente aplicadas à arquitetura e construção, não serão abordadas.

Tecnologias de PR

A escolha da melhor tecnologia de prototipagem rápida é um desafio. Sem experiência e conhecimento das diversas formas de PR para arquitetura, disponíveis no mercado, pode ser uma tarefa difícil e, talvez, desafiadora. Nem todas são direcionadas para todas as situações. As características físicas de um modelo definem sua qualidade e determinam o sucesso ou a limitação da tecnologia aplicada. Muitas tecnologias, hoje, são utilizadas apenas para a função de visualização de peças e protótipos, ou seja, sem um comprometimento funcional. São consideradas por alguns fabricantes, como modeladores conceituais (*Concept Modeler*), pois não têm a preocupação com resistência e precisão dos modelos resultantes. Seus modelos destinam-se para diversas análises nas quais se incluem túneis de vento, estudos de iluminação natural e para a identificação de erros de design nas primeiras fases do projeto. Wohlers (2008)

¹² CTI - <http://www.cti.gov.br/>

classifica os modeladores conceituais como aqueles que devem ser usados nas fases iniciais de projeto, fazendo uma analogia em que “se o modelo físico é o ápice da representação arquitetônica, então o modelador conceitual pode ser comparado a um rápido croqui num guardanapo”.

Existem hoje no mercado inúmeras tecnologias e processos de prototipagem rápida orientadas para uma infinidade de objetivos. Para esta pesquisa, foram selecionadas algumas técnicas as quais, de alguma forma, podem auxiliar na prática projetual de arquitetura. A seguir, são descritas onze técnicas de prototipagem rápida, pelo processo aditivo de material, que se aplicam à arquitetura bem como a outras áreas não relacionadas. As tecnologias disponíveis e relatadas aqui estão divididas de acordo com o tipo de material que utilizam para a confecção dos modelos: (1) Sólidos; (2) Líquidos; (3) Pó e (4) Lâminas, identificadas e resumidas na tabela 2.2. Esta categorização se deu primordialmente pelo estado inicial em que a matéria-prima utilizada se encontra. Embora os processos baseados em lâminas utilizem matéria-prima considerada como sólida, ou seja, papel ou chapas de alumínio, optou-se por separá-los em um quarto grupo devido à sua especificidade na produção, um pouco diferenciada das do grupo de sólidos.

Tabela 2.2 – Processos aditivos analisados

Baseados em Sólidos	Baseados em Líquidos	Baseados em Pó	Baseados em Lâminas
FDM (<i>Fused Deposition Modeling</i>) - Modelagem por Fusão e Deposição	SLA (<i>Stereolithography</i>) - Estereolitografia	SLS (<i>Selective Laser Sintering</i>) – Sinterização Seletiva a Laser	LOM (<i>Laminated Object Manufacturing</i>) – Manufatura de objetos laminados
MJM (<i>Multi Jet Modeling</i>) - Processo de Modelagem por Jato de Tinta	PolyJet – Impressão à jato de fotopolímero	3DP (<i>3D Printer</i>) – Impressão 3D	PLT (<i>Paper Lamination Technology</i>) – Tecnologia em Laminação de Papel
BenchTop – Processo de modelagem por jato de tinta		CAM-LEM (<i>Computer Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials</i>) – Computador auxiliando a manufatura de materiais de engenharia laminados	
		EBM (<i>Electron Beam Melting</i>) – Derretimento por feixe de elétrons	

Processos baseados em Sólidos

O material utilizado para a confecção das peças desse grupo encontra-se no estado sólido, podendo ser obtido em forma de filamentos plásticos ou qualquer outra forma, pois serão derretidos antes de serem depositados. Foram selecionados três processos, descritos a seguir:

FDM – *Fused Deposition Modeling* (Modelagem por Fusão e Deposição)

A tecnologia de Modelagem por Fusão e Deposição utiliza material plástico ABS e policarbonatos em forma de filamento que são tracionados para um cabeçote com um bico extrusor, derretidos e expelidos, também em filamentos, criando camada por camada (com o equivalente a 0.127 mm, dependendo do bico), até completar o modelo. O cabeçote de extrusão aquecido movimenta-se nos eixos X e Y, enquanto a base, onde a peça será construída, movimenta-se no eixo Z (Figura 2.44). À medida que o filamento de material, já derretido, chega à extremidade do bico extrusor, vai sendo depositado e solidificado, aderindo-se à camada anterior. A distância de movimento no eixo Z vai depender dos ajustes pré-estabelecidos no *software* utilizado para a preparação do arquivo. Seus modelos têm boa durabilidade, com a possibilidade de processamento em cera ou plásticos coloridos.

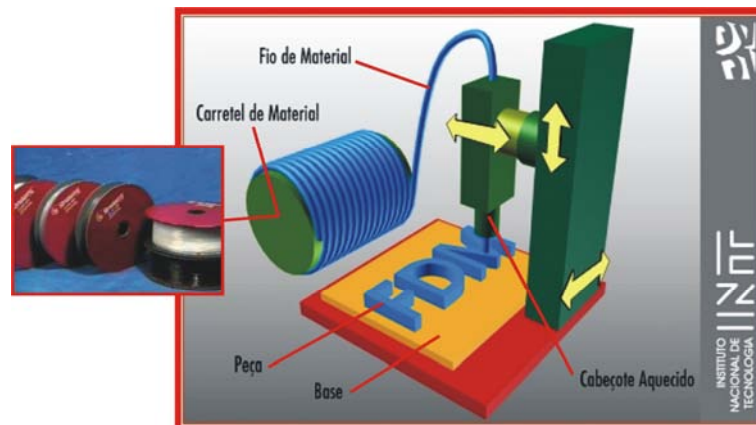


Figura 2.44: Processo FDM - *Fused Deposition Modeling* (Modelagem por Fusão e Deposição)
Fonte: Silva (2008)

Como o sistema FDM é patenteado pela Stratasys, Inc., um caso específico de impressão com essa tecnologia em um equipamento da empresa, o modelo Prodigy Plus, será demonstrado aqui para melhor compreensão de seu funcionamento. A figura 2.45 mostra a preparação desse equipamento para a impressão 3D em que, primeiramente, há o carregamento dos dois cartuchos contendo o plástico ABS¹³, em forma de filamento. Um dos cartuchos contém material de cor branca que será a peça a ser prototipada após seu derretimento; o outro cartucho contém material de cor marrom que será o eventual suporte para partes da peça que estejam em balanço. Completando, o posicionamento e travamento da plataforma (203 x 203 x 305 mm) onde o objeto será construído são efetuados e a porta da máquina fechada e travada. Geralmente, estes equipamentos possuem um sistema de segurança que garantem a interrupção da máquina caso a porta de acesso seja aberta ou violada, entretanto o modelo pode ser reiniciado se a porta for aberta.



Figura 2.45: Preparação de equipamento Stratasys Prodigy Plus
Fotos: Regiane Pupo

Depois de exportado em arquivo STL a partir do arquivo digital em CAD, o modelo é importado pelo *software* de manipulação da máquina para a preparação para a impressão, cuja seqüência pode ser observada na figura 2.46. No caso das máquinas da Stratasys, utiliza-se o *software* INSIGHT, da própria empresa e que acompanha os procedimentos do equipamento. A verificação das camadas a serem impressas, nesse

¹³ Plástico ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*): Fisicamente, é um material leve, fácil de moldar mas ainda assim resistente, podendo ser utilizado entre os -25 °C e os +60 °C.
Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/ABS_\(pl%C3%A1stico\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/ABS_(pl%C3%A1stico))

momento é importante para a confirmação de que o material, da peça e de suporte, não seja desperdiçado e nem escasso. O material de suporte, além de ser importante para as áreas da peça que não têm sustentação, é também utilizado como base da peça, para que quando retirada da plataforma, não seja danificada. Juntamente com a estimativa do tempo de impressão, outro fator importante é a localização da peça na bandeja de impressão. É possível imprimir vários *Builds* (peças a serem construídas) de uma só vez, otimizando tempo. Finalmente, é iniciada a construção da peça, após seu envio pelo *software*. Depois de pronta, a peça deve ser retirada da bandeja e o suporte (de material marrom) removido. Uma das desvantagens do processo FDM é o tempo de impressão. No caso desse exemplo da figura 2.46, uma treliça irregular, com dimensões aproximadas de 15X8 cm, o processo de impressão levou 12 horas.



Figura 2.46: Interface software INSIGHT para equipamento Stratasys Prodigy Plus
Fotos: Regiane Pupo

Em algumas situações, seria fisicamente impossível a construção de peças com essa técnica se não fossem os suportes para sustentá-las. Portanto, é inevitável que os sistemas FDM necessitem de um pós-processamento, para a retirada desse material que, depois de impresso, não tem mais função. Nesse momento, esse material de suporte, que é solúvel em água e solvente, deve ser removido manualmente (Figura 2.47) ou por um sistema de imersão para peças muito pequenas ou com áreas de difícil acesso (Figura 2.48).



Figura 2.47: Retirada do material de suporte manualmente
Foto: Regiane Pupo

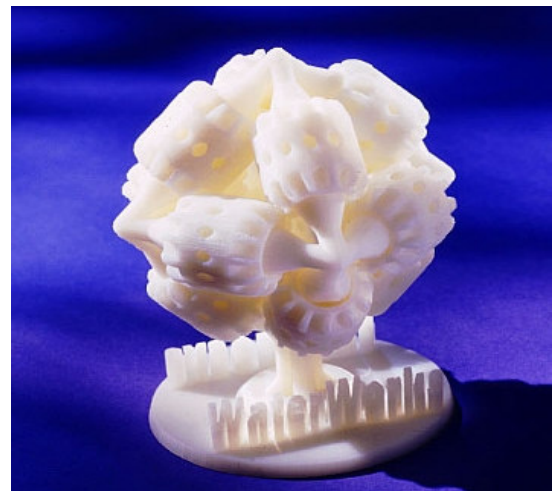


Figura 2.48: Peça construída em um único bloco com remoção de material de suporte por ultra-som
Fonte: FDM Todd Grimm, 2006

O procedimento de remoção dos suportes por imersão, ilustrado na figura 2.49, é efetuado com a ajuda de um equipamento de limpeza, o Duratop 3040, no qual a peça fica imersa numa solução de água quente (aproximadamente 60 graus Celsius) e soda cáustica, que dissolve os suportes, além de limpar a gordura, pó ou outros contaminadores de superfícies com aplicações de processos ultra-sônicos.

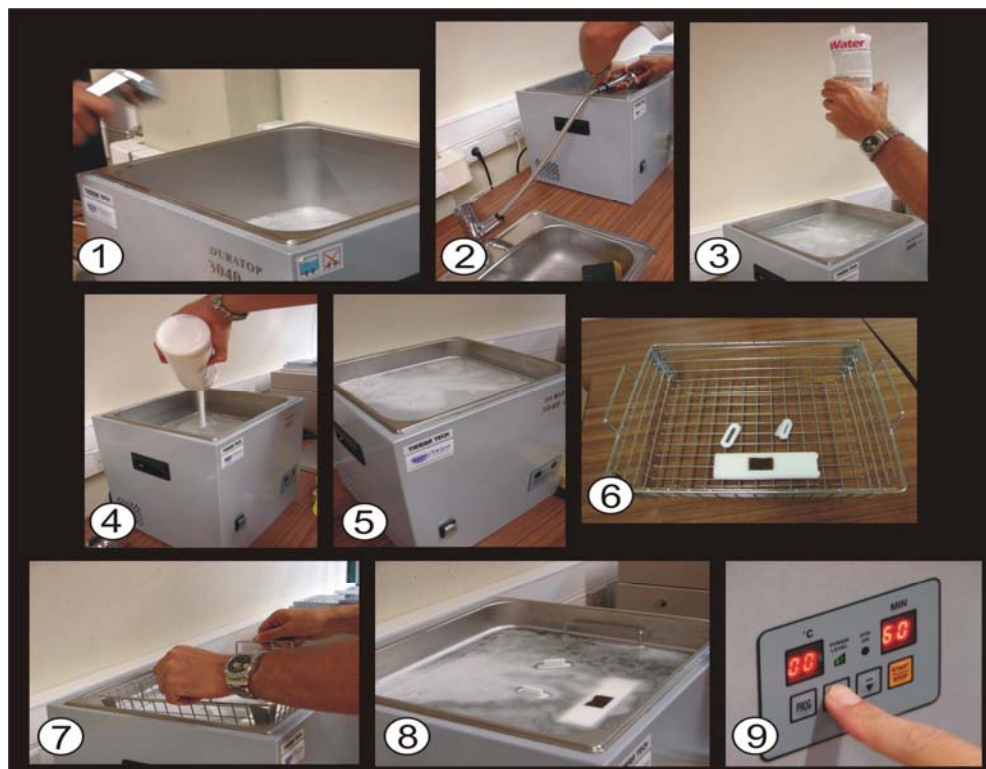


Figura 2.49: Retirada de material de suporte por imersão e ultra-som
Fotos: Regiane Pupo

Todos os sistemas FDM utilizam o plástico ABS e o ABS Plus, este último cerca de 40% mais forte que o normal. Outro material, o policarbonato, também está sendo utilizado nos modelos Titan e Vantage Si, da mesma empresa Stratasys. A resistência adicional que este material possui produz modelos que suportam grandes forças e pesos superiores ao ABS. Ainda, materiais como (1) o *polyphenysulfone*, que oferece alta resistência ao calor e a produtos químicos; (2) elastômeros, que se comportam como uma “borracha” de alta resistência, (3) cera, especialmente desenvolvida para a criação de peças fundidas e mais recentemente (4) um material de grau médico, que pode ser esterilizado com radiação gama ou óxido de etileno, podem ser utilizados nesse tipo de equipamento. Incluindo a cor branca, o ABS pode ser adquirido em oito cores diferentes além de translúcido. Segundo o site da empresa¹⁴, no final de 2007, a Stratasys apresentou ao mercado a FDM 900mc (“mc” equivale a *manufacturing center* – centro de manufatura) que contém o maior e mais sofisticado

¹⁴

www.stratasys.com

sistema FDM, com uma área de impressão de 915 x 610 x 915 mm. Com novidades no cabeçote de impressão e velocidade muito mais alta, a Stratasys promete a manufatura direta de partes. Na verdade, a própria tecnologia FDM foi utilizada para a manufatura de partes desse novo equipamento, como as bordas do painel *touch-screen* e puxadores.

MJM - *Multi Jet Modeling* - Processo de modelagem por jato de tinta

Multi Jet Modeling, também conhecida por *ThermoJet* ou Processo de Modelagem por Jato de Tinta, é um processo de prototipagem rápida caracterizado pela extrusão de material, por temperatura, em bicos de diâmetros calibrados. O mecanismo básico é um cabeçote, que se movimenta numa direção X, e uma plataforma, que se movimenta nas direções Y e Z, conforme o tamanho do objeto. O material termoplástico é aquecido e, quando derretido e no estado líquido, é expelido pelo cabeçote, através de 96 orifícios, que se abrem e se fecham pulverizando, em minúsculas partículas de material, que esfriam e endurecem no impacto para formar o objeto sólido. Enquanto ele executa um movimento repetitivo de vai-e-vem na direção X, simultaneamente a plataforma se movimenta na direção Z, para criar uma nova camada. No caso de objetos maiores do que o cabeçote, a plataforma se movimenta também na direção Y, para permitir a construção do modelo. Essa técnica é muito empregada para obtenção de modelos pelo processo da cera perdida (ARTIS, 2006), geralmente usado para a criação de moldes que requerem alta precisão em suas aplicações. O sistema necessita de uma estrutura de suportes, para as eventuais partes em balanço ou separadas do objeto principal, que são impressas de maneira similar à peça e criados como colunas verticais com diâmetro aproximado de 0.22 mm e espaçamento de 0.075 mm. Segundo Ryder (2002, p. 281), a precisão desse sistema está em torno de 300 e 200 *dpi*¹⁵ nos eixos X e Y, respectivamente, mas seu material não é forte o suficiente para ser usado em modelos para testes funcionais, direcionando-o para a área de modelagem

¹⁵ Dpi – dots per inch (pontos por polegada)

conceitual (*Concept Modeller*). A figura 2.50 ilustra o processo de modelagem por jato de tinta.

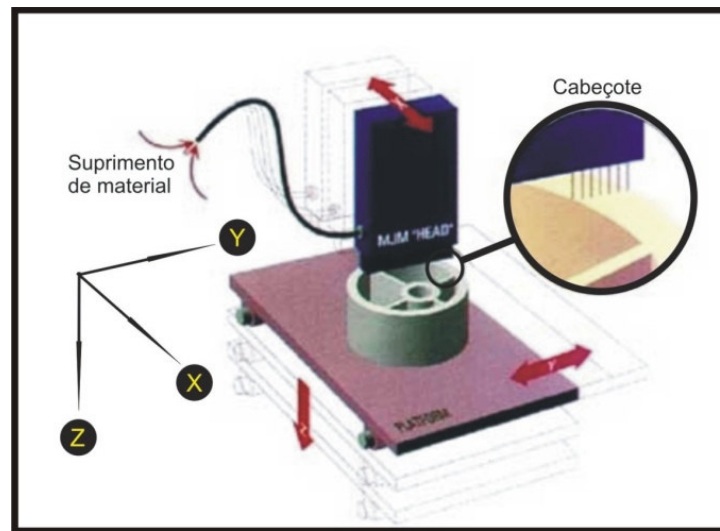


Figura 2.50: Processo MJM
Fonte: Adaptação de <http://www.bobflint.com/Tutorial/sld048.htm>

BenchTop – Jato de tinta

A empresa americana SolidScape Inc.¹⁶, que comercializa e fabrica essa tecnologia, diferencia seus produtos pelo uso de matéria-prima não tóxica, o que proporciona sua utilização no escritório, como uma impressora. Essa tecnologia utiliza dois tipos de material, um termoplástico (epóxi ou silicone) para a impressão da peça e uma cera para os suportes. Com equipamento de tamanho reduzido (71,12cm de largura x 49,53cm de profundidade x 49,53cm de altura) e área de impressão variando entre os modelos disponíveis (entre 150x150x100mm e 30x15x15mm), o processo tem ótima resolução, sendo indicado para peças muito pequenas (Figura 2.51).

¹⁶ <http://www.solid-scape.com/>



Figura 2.51: Exemplos de peças produzidas pela tecnologia Bench-Top
Fonte: www.solid-scape.com

Exige pouco pós-processamento, pois o material que utiliza como suporte, uma cera, é facilmente derretido após a finalização do processo de impressão, pela imersão em óleo mineral em temperatura de 60 graus Celsius. A figura 2.52 mostra o processo de impressão da tecnologia BenchTop, em que consiste em dois cabeçotes de impressão tipo jato de tinta (um para cada material) utilizados simultaneamente. Após ser liquefeito, o material é ejetado na plataforma de construção, camada a camada, e se solidifica à medida que entra em contato com a camada anterior. Após a impressão de cada camada, uma ferramenta trabalha como uma fresa que suaviza a sua superfície deixando-a pronta para a próxima camada. O material que se desprende dessa etapa é aspirado por um coletor. A cera, além de servir como material de suporte para partes em balanços ou furos dentro da peça, é depositada ao redor da peça para que tenha resistência durante cada fresamento.

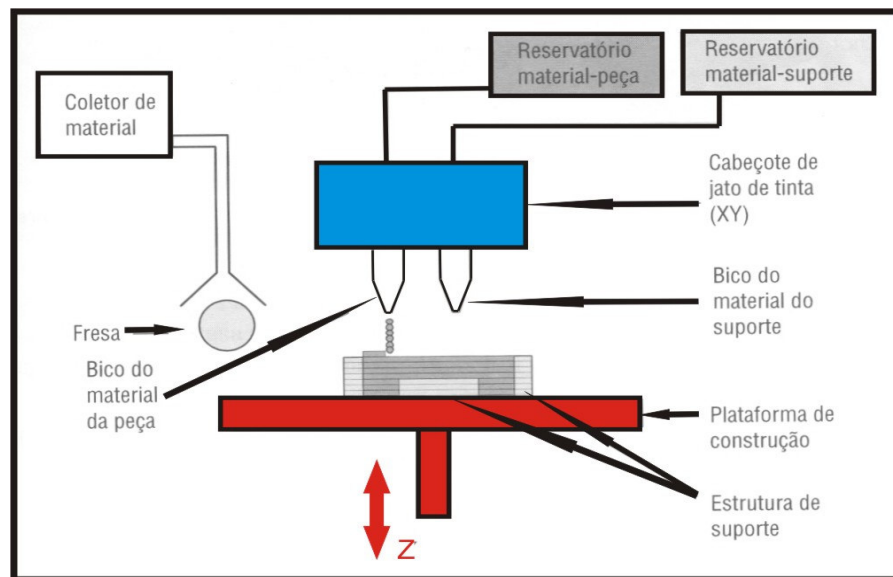


Figura 2.52: Processo BenchTop da SolidScape
Fonte: Adaptação Volpato et al (2007)

Processos baseados em Líquidos

Pertencem a este grupo, as tecnologias que utilizam materiais em estado líquido antes do processamento para a confecção das peças. Foram selecionados dois processos que estão descritos a seguir.

SLA – *Stereolithography Apparatus* (Aparato de Estereolitografia)

Também conhecida como SL – *Stereolithograph*, ou simplesmente estereolitografia, foi a primeira tecnologia de prototipagem rápida utilizada comercialmente (durante a década de 1980), apresentada pela empresa 3D Systems, Inc., e continua sendo uma das mais populares (Volpato et al, 2007, p. 57). O sistema utiliza um laser ultravioleta para curar resinas de foto polímero líquido, camada por camada, até que o modelo esteja solidificado e completo. A figura 2.53 mostra o processo de construção de modelos 3D utilizando a tecnologia de estereolitografia.

Uma cuba com resina fotossensível contém uma plataforma mergulhada que se desloca para baixo e para cima, à medida que cada camada da peça vai sendo construída. Um feixe de laser é movimentado nas direções X e Y, de acordo com a geometria 2D, proveniente do fatiamento do objeto 3D vindo do sistema CAD. A cada camada, que corresponde a uma fatia, o laser atinge à resina líquida, na superfície da cuba, que se polimeriza, mudando do estado líquido para o sólido. Após o término de cada camada, a plataforma em que o objeto está sendo construído é abaixada (na distância equivalente a uma camada). Esse procedimento se repete até que todas as camadas sejam solidificadas, aderindo-se entre si, completando o objeto inteiro. O sistema necessita de suportes para partes em balanço ou que estejam desconectadas da peça principal, cujo material é o mesmo da peça, calculado automaticamente pelo sistema do processo.

Apesar de ter um reduzido número de resinas fotossensíveis, o sistema tem boas condições de precisão e acabamento de superfície e muito utilizado para visualizações conceituais e análises de forma e ajustes. O pós-processamento inclui limpeza com solvente para retirada de resina não curada e a remoção dos suportes. Finalizando, a peça ainda deve permanecer em forno Ultravioleta (UV) para a obtenção da cura completa da resina, aumentando a resistência mecânica da peça.

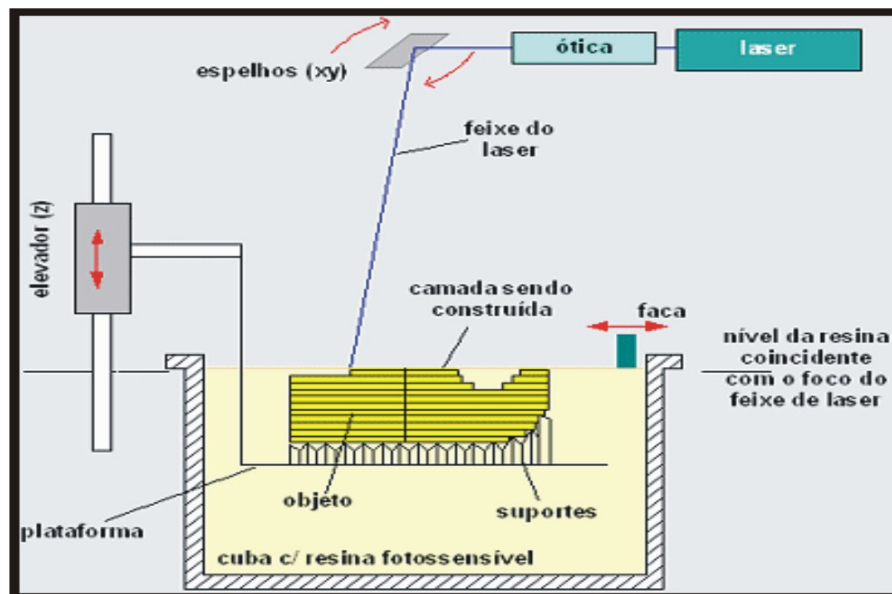


Figura 2.53: Processo de impressão 3D em tecnologia SLA
 Fonte: http://www.cimject.ufsc.br/knowledge/03_knowledge_RP_estereo.htm

Segundo Ryder (2002) a variedade de materiais para esta tecnologia tem crescido rapidamente, desde os resistentes à umidade até os de alta resistência mecânica e à temperatura. Com a vantagem de ser mundialmente difundida, pois possui precisão e qualidade de superfície, a grande desvantagem do processo é a agressividade da resina utilizada (tóxica ao ser humano), devendo ser manuseada com extremo cuidado. A figura 2.54 mostra alguns exemplos de peças prototipadas com a tecnologia SLA.



Figura 2.54: Peças e equipamento SLA
 Fonte: www.3dsystems.com

POLYJET – Impressão à jato de foto polímero

Desenvolvida pela empresa Object Geometries Ltd., de Israel, a tecnologia PolyJet¹⁷ foi lançada no mercado em 2001. Durante o primeiro ano ficou conhecida pelos nomes dos equipamentos que incorporavam a tecnologia, Quadra e QuadraTempo (GRIMM, 2008), que cria protótipos rápidos com um processo de jato de tinta, utilizando cartuchos similares aos de impressoras. No lugar da tinta, entretanto, a cabeça de impressão deposita um foto polímero¹⁸ líquido numa plataforma e é imediatamente atingido por uma luz ultravioleta. Dentre suas características estão a espessura da camada de impressão (20 microns) e a resolução (abaixo de 0.0015”). O que impressiona nessa tecnologia é que esta resolução pode ser atingida em tempos comparáveis à impressões efetuadas em SLA, com 0.006”. Com resolução alta e camadas muito finas, a tecnologia Polyjet consegue produzir superfícies com características superiores em relação a precisão, acabamento e velocidade de impressão. Dependendo do uso do protótipo produzido, as superfícies não precisam de nenhum acabamento posterior à produção. Uma exceção é a superfície de baixo, especialmente das maiores em áreas planas. Há a necessidade de utilização de suportes para peças em balanço, impressos simultaneamente à peça, por outro cabeçote similar, de fácil remoção por jateamento de água. O contato entre o material de suporte e a parte de baixo da peça geralmente deixa pequenos pontos na superfície. É importante lembrar a diferença de qualidade entre as superfícies que necessitam de material de suporte e as que não. A área em contato com o material de suporte sempre terá um acabamento fosco e um pouco texturizada, enquanto que as outras terão uma aparência lisa e brilhante.

A tecnologia Polyjet tem condições de produzir protótipos com um grau preciso de detalhamento sem aumentar o tempo de construção. Alguns exemplos de aplicações da tecnologia PolyJet podem ser vistas na figura 2.55. Os foto polímeros utilizados na

¹⁷ <http://www.objet.com/Default.aspx?tabid=92>

¹⁸ Resina líquida que utiliza a luz (visível, ultravioleta) como catalisador para início da polimerização, com a qual o material solidifica. Esta técnica é utilizada por vários processos de prototipagem rápida.

tecnologia Polyjet oferecem uma resistência muito menor que outras tecnologias, nas mesmas condições ambientais. As principais preocupações são condições de resistência a temperaturas acima de 46 °C, umidade e produtos químicos.



Figura 2.55: Exemplos de aplicações da tecnologia PolyJet
Fonte: <http://www.objet.com/Default.aspx?tabid=83>

A principal desvantagem desta tecnologia é a área de construção dos protótipos, uma das menores do mercado, medindo 26.9 x 30 x 19.8 cm. Em geral, modelos prototipados em Polyjet são preferencialmente escolhidos para peças de apresentação. A combinação de acabamento de superfícies e precisão de peças pequenas faz desta tecnologia a ideal para peças finais. Com a possibilidade de uso de resinas com diferentes propriedades e cores, podem ser pintadas e acabadas para uma representação realística de um produto que ainda não foi produzido, utilizando revestimentos metalizados (Figura 2.56), texturizados, translúcidos, entre outros. A relação custo-benefício de sua produção a torna muito mais atrativa que em relação à tecnologia como SLA, por exemplo (Grimm, 2008).



Figura 2.56: Metalização de protótipo em PolyJet

Fonte: Adaptação de <http://www.objet.com/Misc/ApplicationNotesLeftPane/MetalCoating/tabid/269/Default.aspx>

Durante a EuroMold 2007¹⁹, feira mundial para a manufatura de moldes, ferramentaria, design e desenvolvimento de aplicativos, evento que reuniu mais de 61.000 visitantes, em Frankfurt, a Object Geometries lançou um sistema de impressora 3D, a Connex500, que utiliza dois materiais simultaneamente, utilizando a tecnologia Polyjet.

Processos baseados em Pó

Para este grupo, foram selecionadas quatro tecnologias que utilizam matéria-prima em estado de pó para a construção dos protótipos.

SLS – *Selective Laser Sintering* (Sinterização Seletiva a Laser)

Desenvolvida na Universidade do Texas, em Austin, nos Estados Unidos, este sistema utiliza um laser CO₂ para queimar, ou sinterizar²⁰, um material (pó), camada por camada, até que o modelo esteja totalmente construído. Essa tecnologia permite que os objetos sejam construídos a partir de uma variedade de materiais. Seu mecanismo muito se assemelha à estereolitografia (SLA), mas ao invés de líquidos, são utilizados

¹⁹ www.euromold.com

²⁰ Sinterizar: Processo em que duas ou mais partículas sólidas se aglutinam pelo efeito do aquecimento a uma temperatura inferior à de fusão, mas suficientemente alta para possibilitar a difusão dos átomos das duas redes cristalinas (AURELIO, 2005).

pós. Uma fonte de laser transforma o pó em sólido por um processo de aquecimento instantâneo que permite que as superfícies de partículas se fundam numa operação de “sinterização” (Shodek, 2005, p. 291). A figura 2.57 ilustra o processo SLS, que utiliza um cilindro sobre uma plataforma para inicialmente nivelar e espalhar o pó. Na continuação, um feixe de laser, deslocado por um sistema de varredura, é então direcionado à superfície onde está o pó espalhado, cujas partículas são sinterizadas de acordo com a geometria da camada 2D da peça. A plataforma que suporta a peça se desloca no eixo Z, para baixo, exatamente na distancia igual à espessura da camada e uma nova camada de material é espalhada na plataforma, sobre a anterior. O processo é repetido até que todas as camadas sejam depositadas e a peça esteja totalmente completa. O material que não é fundido suporta as partes solidificadas, permitindo a construção de peças em balanço ou com furos, sem a necessidade de suportes, removido ao final do processo.

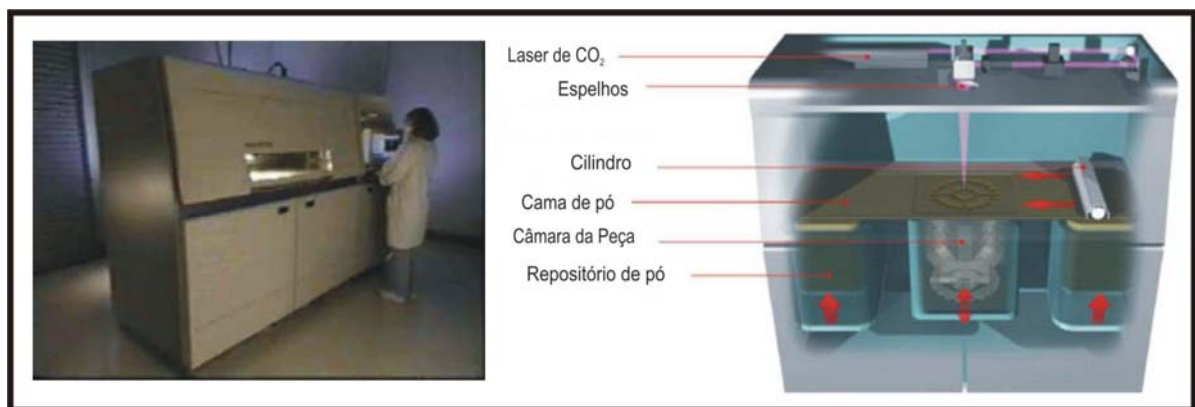


Figura 2.57: Equipamento e processo SLS
Fonte: Adaptação de Accelareted Technologies, Inc. - <http://www.atirapid.com/sls2.php>

Por intermédio da tecnologia SLS é possível obter peças basicamente de qualquer material que possa ser transformado em pó, muitos até se mostram adequados para análises funcionais. Segundo Volpato et al (2007, p. 83) dentre esses materiais estão náilon, poliamida, poliamida com micro esferas de vidro, elastômeros, cerâmica e metal. Para este último há a necessidade de pós-processamento em forno à alta temperatura após a retirada da peça da máquina. Os resultados têm boa precisão e

durabilidade, no entanto, três desvantagens principais podem ser limitadoras quanto ao uso desta tecnologia: (1) acabamento da superfície pode eventualmente conter poros que podem causar infiltrações; (2) tempo demasiadamente demorado de secagem e (3) alto custo do equipamento. A empresa americana 3D Systems é detentora dos direitos dessa tecnologia desde 2001, antes comercializada pela DTM Corporation. As aplicações podem variar entre a indústria aeroespacial (militar e comercial), medicina ortodôntica, aparelhos de audição, design automobilístico, design de calçados, moldes para injeção de baixo volume de peças e, mais recentemente, para maquetes de arquitetura. A figura 2.58 mostra o processo de Sinterização em um dos últimos lançamentos da 3Dsystems, a Sinterstation SLS Pro, em que, além da impressão 3D, também possui digitalizador 3D.

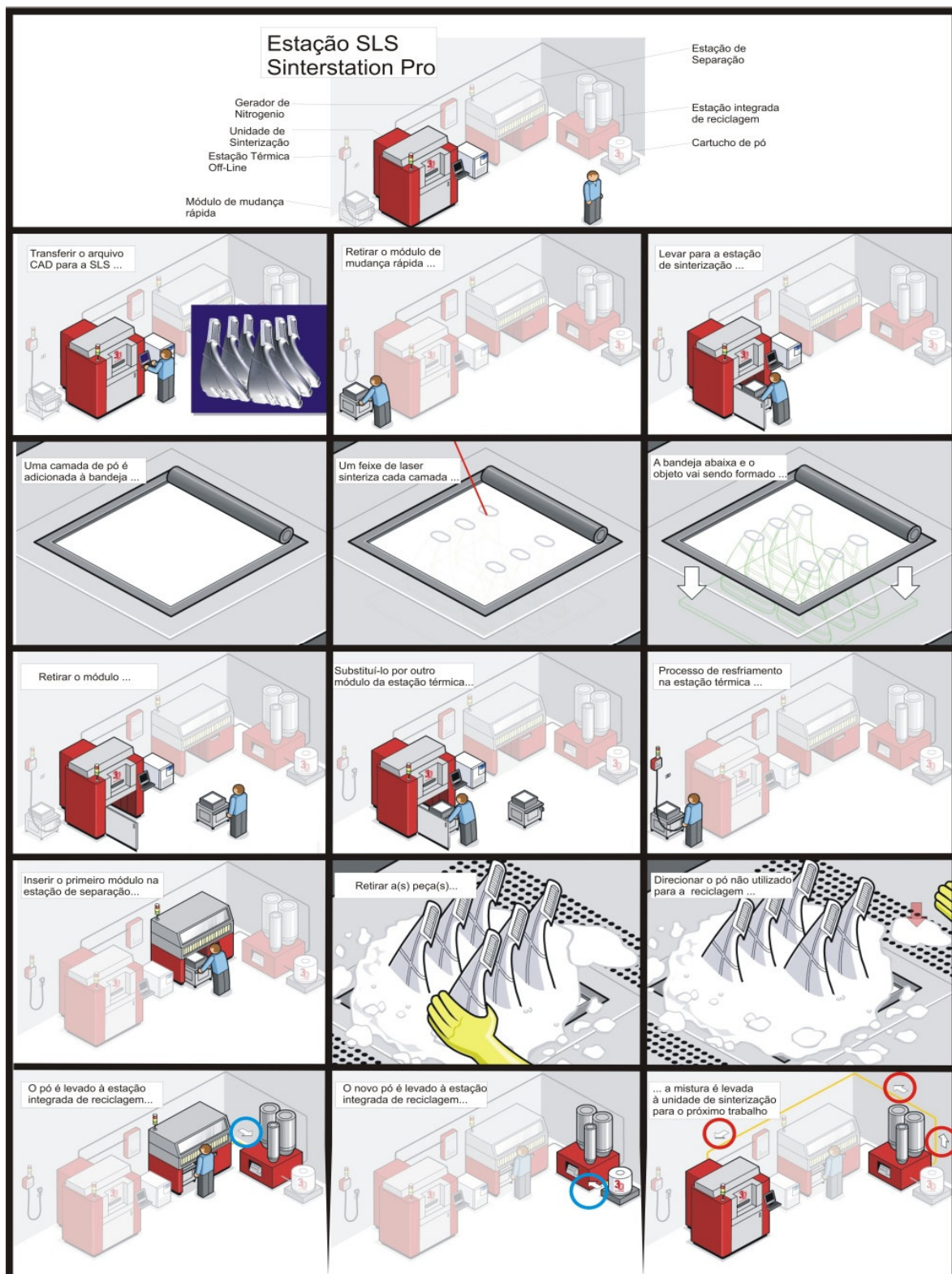


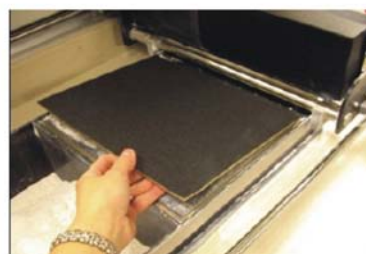
Figura 2.58: Sistema de Sinterização Pro – 3DSsystems
 Fonte: Adaptação de http://www.3dsystems.com/products/sls/sinterstation_pro/index.asp

3DP – 3D Printer

Desenvolvida originalmente pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT), nos Estados Unidos, este sistema é um dos que mais crescem no mercado pela velocidade de processamento e custo de material. Segundo Volpato et al (2007, pp. 90) a empresa ZCorp (EUA) adquiriu a licença para continuar o desenvolvimento e comercializar equipamentos baseados no princípio da tecnologia 3DP. Essa tecnologia utiliza um cabeçote de impressão para depositar um líquido adesivo catalisador (*binder*) sobre o pó de gesso, aglutinando-os. A figura 2.59 mostra a seqüência de impressão 3DP, na impressora ZCorp 310, em que, inicialmente, se compõe de abastecimento de pó em uma das plataformas de alimentação (*feed*) e deve ser abastecida com o aglutinante e o cartucho de impressão (similar aos de impressoras jato de tinta) em seus respectivos compartimentos. Ao iniciar o processo, um rolo transfere uma fina camada de pó da bandeja de alimentação (*feed*) para a de construção (*build*), espalhando-o e nivelando-o nessa bandeja enquanto que, alternadamente, o cabeçote deposita o líquido aglutinante de acordo com a geometria 2D do objeto a ser construído. Esse processo é efetuado camada por camada, até que todas que compõem o objeto sejam depositadas. Em uma etapa final, a máquina entra em um processo de aquecimento por aproximadamente 60 minutos, durante o qual a peça não deve ser retirada, e é necessário para que a cura entre o pó e o aglutinante seja estabilizada.



Impressão 3DP ZCorp 310



1 As duas plataformas da máquina;

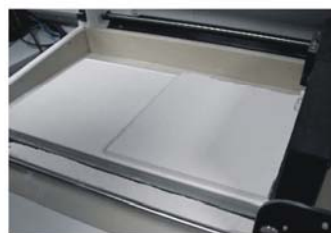
2 Plataforma onde o objeto será construído (BUILD);



3 Pó para a impressão;

4 Abastecer a plataforma de alimentação (FEED)

5 Espalhar o pó pela bandeja uniformemente;



6 Pressionar o pó na plataforma de alimentação;

7 Impressão: o cabeçote deposita o aglutinante (*binder*) entre as sucessivas camadas de pó;

8 Final da impressão;



9 Elevar a plataforma onde o objeto foi construído (BUILD);

10 Retirar o excesso de pó;

11 Transportar a bandeja com o objeto para o pós-processamento;

Figura 2.59: Impressão 3DP em ZCorp310
Fotos: Regiane Pupo

Após esse prazo, o excesso de pó é retirado manualmente, com a ajuda de um pincel ou um aspirador e o objeto é transferido para uma estação de jateamento para um acabamento mais refinado (Figura 2.60). Esse equipamento é composto por aspirador que aspira o pó em excesso e o envia para um recipiente em que é armazenado para posterior reutilização, e um aerógrafo que funciona como expelidor de pó, que também é reutilizado posteriormente. Tanto o aspirador quanto o aerógrafo possuem diversos bicos adaptáveis que são utilizados em peças, orifícios e cavidades de diferentes configurações. Todo o processo de pós-processamento é efetuado através de um vidro de proteção, que evita a suspensão do pó retirado das peças prototipadas, pois são prejudiciais à saúde se inspirados.



Figura 2.60: Pós-processamento do sistema 3DP
Fonte: Adaptação de Manual ZCorp 310

O processo não necessita de suportes para partes em balanços, visto que o pó não utilizado na peça, ao seu redor, serve como tal, sendo totalmente reaproveitado depois do processo terminado (Figura 2.61). Teoricamente, qualquer material que possa ser transformado em pó pode ser utilizado nessa tecnologia, sendo os mais comuns a cerâmica, o metal, gesso e material à base de amido. Para cada material, um

aglutinante específico deve ser utilizado. Sendo um dos mais baratos no mercado, o sistema 3DP não tem uma resolução final indicada para peças que requerem um acabamento mais refinado, nem como para estudos de resistência, sendo apropriada para estudos preliminares rápidos de avaliação projetual.



Figura 2.61: Gesso em pó como suporte no processo 3DP
Fotos: Regiane Pupo

A empresa fabricante dessa tecnologia, a americana ZCorporation, lançou no mercado, no início de 2007, a ZPrinter 450, a primeira impressora 3D colorida à base de pó que trabalha com um cartucho de três cores (Wohlers, 2008). O mais interessante desse novo sistema é a possibilidade de remoção automatizada da peça impressa aliada à facilidade de reciclagem do pó não utilizado. Após a impressão completa da peça, a plataforma de construção abaixa e um sistema vibratório e de sucção facilita sua remoção. Além disso, segundo informações do site da empresa²¹, para facilitar o depósito de material (pó e *binder*) na máquina antes da impressão, foi desenvolvido um sistema de cartuchos, que reduz 40% da mão de obra utilizada nesta etapa. A ZPrinter450 é o primeiro equipamento da ZCorp a ser usado diretamente em escritórios (*office friendly*) por ser silenciosa e de fácil manuseio do pó. Mais recentemente, a empresa lançou no mercado dois pós para os modelos monocromáticos, o zp 140 e o zp 131. No primeiro, o material é um composto mais branco à base de água que não necessita de acabamento, e o segundo, um material com base de cor mais viva para partes que requerem um aspecto mais natural além de ser 50% mais resistente que os anteriores. A figura 2.62 mostra alguns exemplos de maquetes desenvolvidas no processo 3DP da ZCorp.

²¹ ZCorp: www.zcorp.com

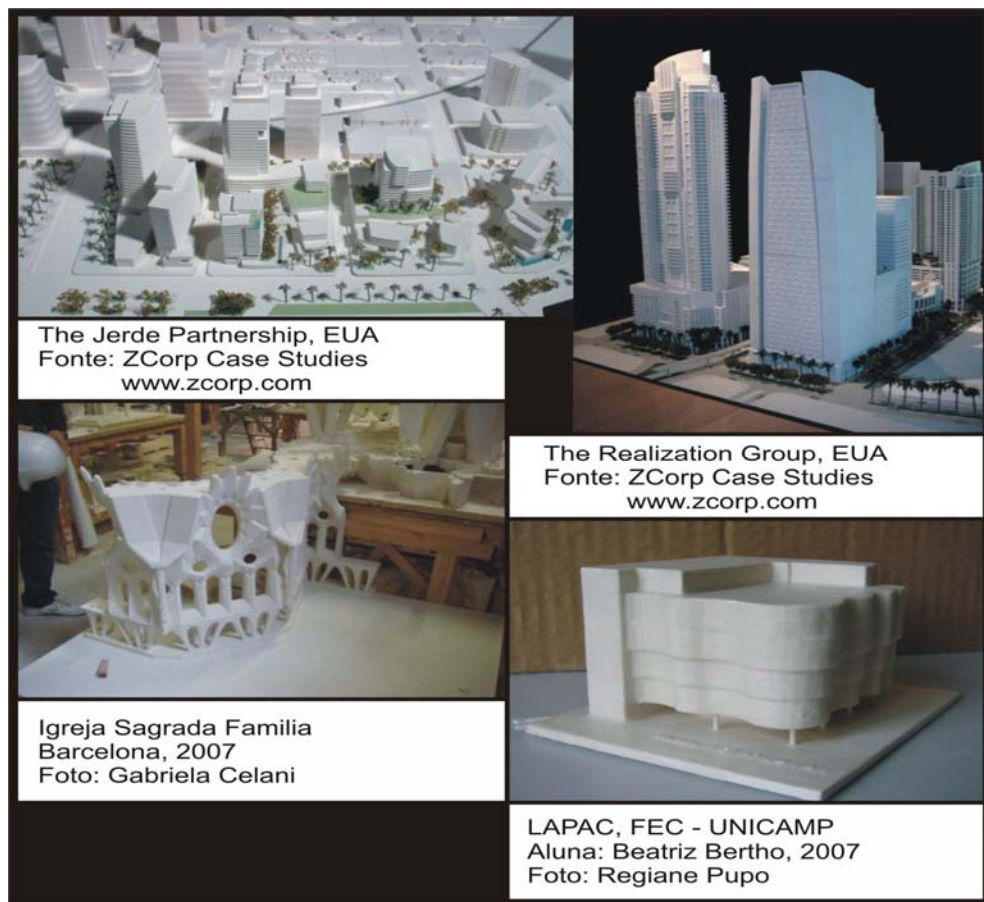


Figura 2.62: alguns exemplos de impressão em 3DP
Fontes: indicadas

CAM-LEM - Computer Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials

A tecnologia CAM-LEM foi desenvolvida inicialmente pela empresa CAM-LEM, Inc. e pela Universidade Case Western Reserve, ambas localizadas em Ohio, nos Estados Unidos. O sistema permite a fabricação direta de componentes cerâmicos e metálicos com geometrias complexas, tanto internas como externamente. Todos os materiais utilizados nessa tecnologia são originalmente na forma de pó transformados em folhas ultrafinas por meio de vários tipos de sistemas de aglutinação. Esta aglutinação cola e solidifica o pó, e é facilmente cortada pelo sistema laser à base de CO₂.

A característica do sistema, assim como outras tecnologias de prototipagem rápida, origina no modelo CAD 3D, que é decomposto em contornos de finas camadas. Estas fatias individuais são cortadas pelo laser e, uma a uma, são empilhadas para a realização física tridimensional da descrição original do CAD. A operação de montagem inclui um procedimento de união das camadas que são posicionadas e fixadas em cada posição relativa ao empilhamento original. Depois da montagem, as camadas são laminadas por pressão isostática a quente visando a total junção para a subsequente operação de sinterização e fusão das camadas e partículas numa estrutura monolítica. O resultado é uma peça tridimensional que exibe não somente a forma geométrica fiel ao projeto em CAD, mas também com comportamento estrutural funcional. A figura 2.63 ilustra todo o processo CAM-LEM.

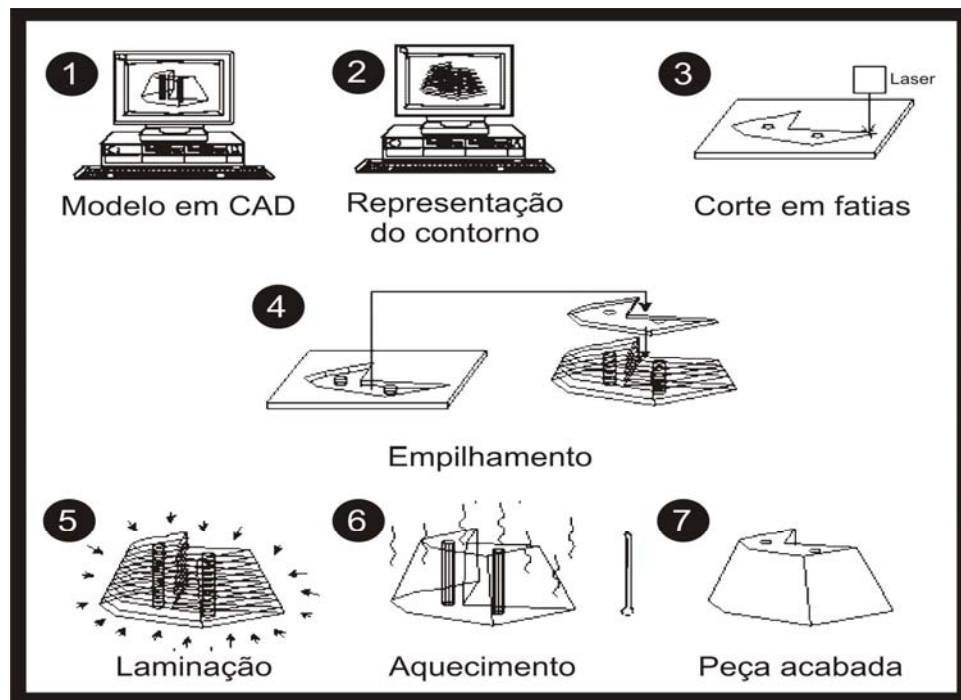


Figura 2.63: Processo CAM-LEM
Fonte: Adaptação de <http://dora.eeap.cwru.edu/camlem/camproc.html>

O processo CAM-LEM tem algumas características que o diferenciam de outros processos de prototipagem rápida, como a fabricação de partes funcionais para testes de durabilidade e resistência, a formação de vazios e canais internos sem a

necessidade de remoção manual de suportes, além da vantagem de utilização de vários materiais no mesmo processo de construção. Segundo Brian Mathewson, diretor da CAM-LEM, Inc, nenhum trabalho tem sido feito com essa tecnologia desde 2000 na Case Western Reserve University, mas a empresa continua em operação, utilizando predominantemente pó cerâmico para a manufatura de peças complexas pequenas que requerem um grau de detalhamento muito apurado. A figura 2.64 mostra dois exemplos de peças produzidas com o sistema CAM-LEM.

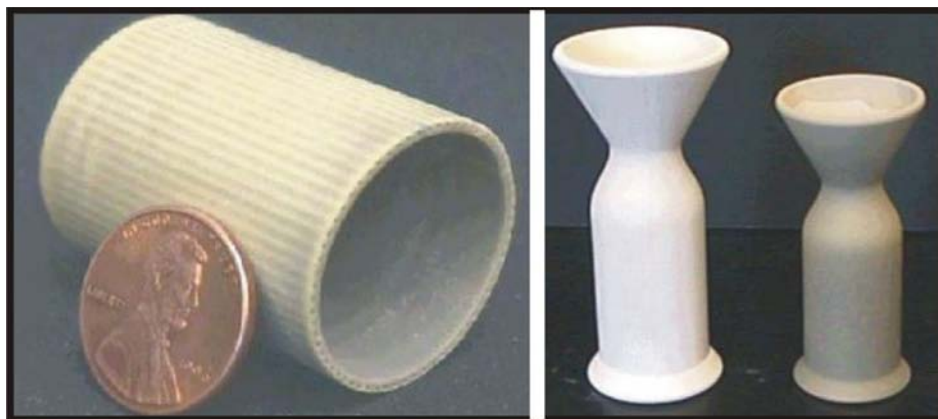


Figura 2.64: Cilindro com canais de resfriamento interno (esquerda) com alto desempenho de resistência térmica e estrutural
Fonte: <http://www.camlem.com/materials.html>

EBM - *Electron Beam Melting* (Derretimento por feixe de elétrons)

A empresa sueca Arcam AB²² produz equipamentos que utilizam metal em pó que ao ser derretido por um feixe de elétrons, comandado pela geometria do objeto a ser impresso, dá origem a protótipos ou peças de utilização final. O processo é denominado pela empresa como “*The CAD to metal process*” – processo do CAD ao metal – e é efetivamente direcionado a protótipos funcionais por produzir partes sólidas em titânio e aço. As matérias-primas hoje disponibilizadas pela empresa para o processo são (1) titânio Ti6Al4V (ASTM²³ F136), (2) titânio Ti6Al4V ELI (ASTM F136), (3) titânio “Grade 2” (ASTM F67) e (4) liga metálica de cobalto e cromo (ASTM F75).

²² <http://www.arcam.com/index.asp>

²³ ASTM: American Society for Testing and Materials - órgão americano de normatização de vários materiais, produtos, sistemas e serviços.

Esses materiais podem criar componentes de alta resistência ao impacto e à temperatura, com geometrias complexas e de grande durabilidade. Com isso, torna-se ideal para análises estruturais que possam ocorrer durante o processo de projeto ou para utilização final. A peça é construída em uma câmara a vácuo, necessária para que os elétrons sigam um caminho direto ao metal, proporcionando um ambiente sem impurezas externas e com excelente controle térmico da peça. Na maioria das vezes há a necessidade de pós-processamento da peça, podendo ser efetuado em qualquer método convencional, tais como fresas de alta velocidade ou lixadeiras, por obter alta resistência ao impacto. A figura 2.65 ilustra o processo de impressão por camadas EBM.

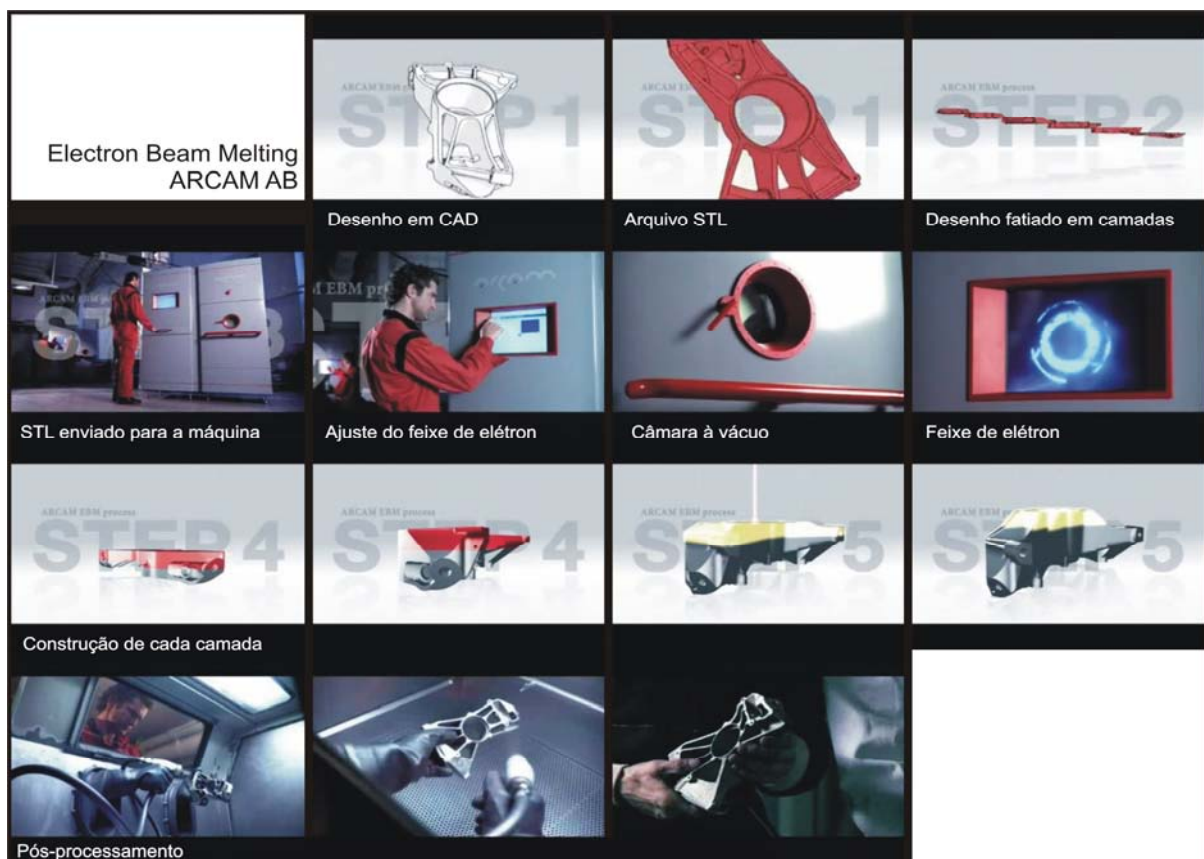


Figura 2.65: Processo de impressão por camadas EBM
Fonte: Adaptação de www.arcam.com

Apesar do seu alto custo de processamento, de aquisição de equipamento e de material esta tecnologia foi aqui inserida por ser pioneira em utilizar a prototipagem para peças com alta resistência estrutural e de impacto, com material metálico 100% denso.

Processos baseados em Lâminas

As tecnologias desse grupo utilizam lâminas de papel como matéria-prima, que podem ser abastecidas individualmente ou em rolo, e ainda de várias espessuras.

LOM – *Laminated Object Manufacturing* (Manufatura por Objeto Laminado)

A tecnologia de manufatura por objeto laminado utiliza um laser infravermelho para cortar uma fina camada sólida de material, que é colado às outras camadas, utilizando um adesivo ativado por calor, num processo contínuo até que o modelo esteja completo. A figura 2.66 mostra detalhadamente o processo LOM em que a matéria prima para a obtenção do modelo 3D é o papel, alimentado por um rolo, adesivado em um dos lados. Após a deposição da folha, o rolo aquecido é passado sobre a superfície do papel ativando o adesivo, que está na parte inferior do papel, unindo-a à anterior. Volpato et al (2007, p. 70) explicam que um feixe de laser CO₂ (25 ou 50 W), direcionado por um conjunto de espelhos controlados por um sistema de deslocamento X-Y, é utilizado para cortar o perfil da geometria da peça, na camada em questão.

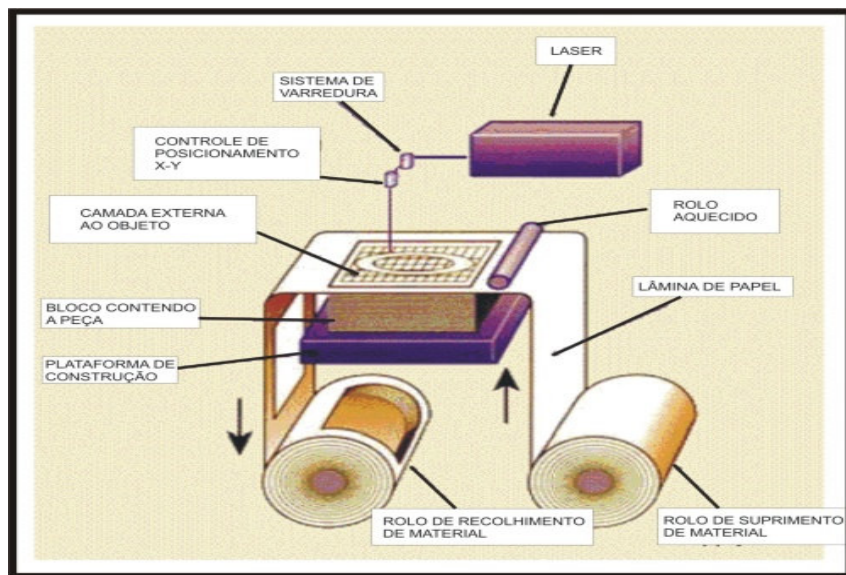


Figura 2.66: Processo LOM

Fonte: Adaptação de http://rpdr.cic.polyu.edu.hk/content/rp_defuncted/lom_introduction.htm

O material que não forma o objeto (ao redor do corte) é compactado e tem a função de suporte natural para a peça durante a sua construção, sendo cortado como uma moldura, e removido manualmente ao final do processo. Na finalização, é formado um bloco retangular de material com a peça em seu interior, pronta para ser extraída (Figura 2.67). O material mais utilizado nessa tecnologia é o papel tipo *Kraft* com adesivo termicamente ativado à base de polietileno. A empresa que comercializa a tecnologia LOM, a Cubic Technology, Inc.²⁴, também fornece o material para o acabamento da peça, tais como resinas epóxi, uretano e silicone, que devem ser pulverizadas sobre a superfície das peças para melhor proteção e durabilidade das mesmas. A principal desvantagem desse processo é a demora e trabalhosa etapa de pós-processamento para a retirada do material em torno da peça e no seu interior, pela acessibilidade dificultada. Como foram utilizados adesivos entre as lâminas de papel, muitas vezes são necessárias ferramentas mais pesadas, como as utilizadas com a madeira, pois a peça se torna robusta e não flexível.

²⁴



Figura 2.67: Pós-processamento e peça pronta
Fonte: www.cubicttechnologies.com

PLT – *Paper Lamination Technology* (Tecnologia por laminação de papel)

Muito similar à tecnologia LOM, a tecnologia por laminação de papel (PLT), desenvolvida pela Kira Corporation Ltd.²⁵, do Japão, utiliza um sistema mecânico com uma faca, ao invés do laser para o corte do papel. O papel pode ser alimentado na máquina de corte de duas maneiras, em rolo ou em folhas já previamente cortadas. A figura 2.68 mostra os dois processos de alimentação de papel da tecnologia PLT, em que na primeira, o processo puxa o papel do rolo e corta uma folha do tamanho adequado, antes do início do corte. Na segunda, as folhas já vêm cortadas e um sistema de alimentação puxa as folhas uma a uma (processo similar a uma impressora).

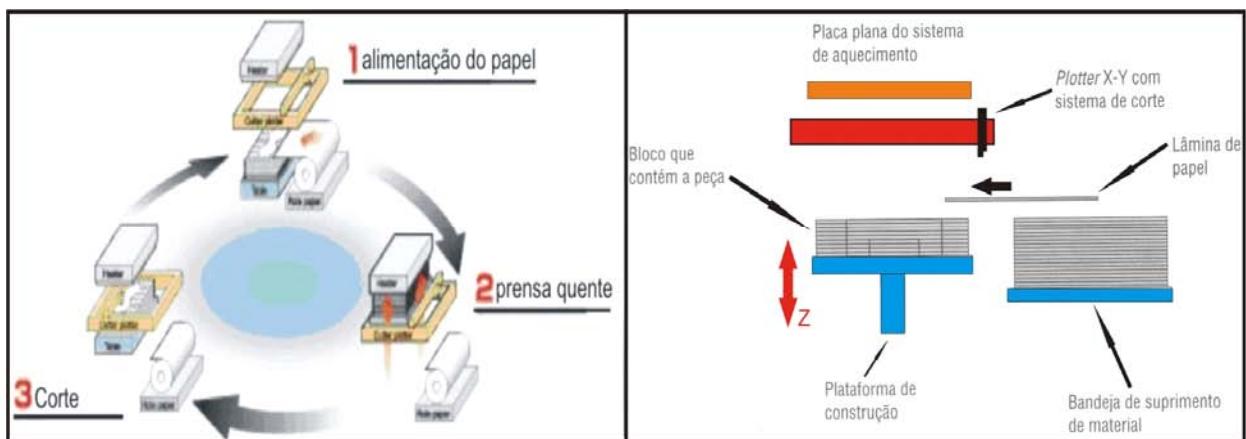


Figura 2.68: Processos PLT de alimentação em rolo (esquerda) e em folhas unitárias (direita)
Fontes: Adaptações de http://www.rapidmockup.com/eg/menu2_5_e.htm e Volpato et al (2007)

Com as folhas cortadas e abastecidas na máquina, a continuidade do processo é a mesma nos dois equipamentos. Primeiramente ocorre uma deposição de um pó de resina na geometria 2D equivalente àquela camada; logo depois, pela elevação da plataforma de construção, uma placa plana com sistema de aquecimento prensa o papel ativando o adesivo na parte inferior deste. Esta folha então, com espessuras que variam entre 0,08 a 0,15 mm, adere à folha de papel anterior, somente onde a resina foi depositada. Esse processo, diferentemente da tecnologia LOM, facilita muito no pós-processamento, pois as rebarbas não são coladas e, portanto podem ser facilmente removidas. Depois da colagem, a plataforma desce e uma faca, similar a um plotter de recorte, corta o perfil da peça. O material que não faz parte da peça serve como suporte natural e é removido ao final do processo. A figura 2.69 mostra o processo de retirada de material que envolve a peça prototipada.

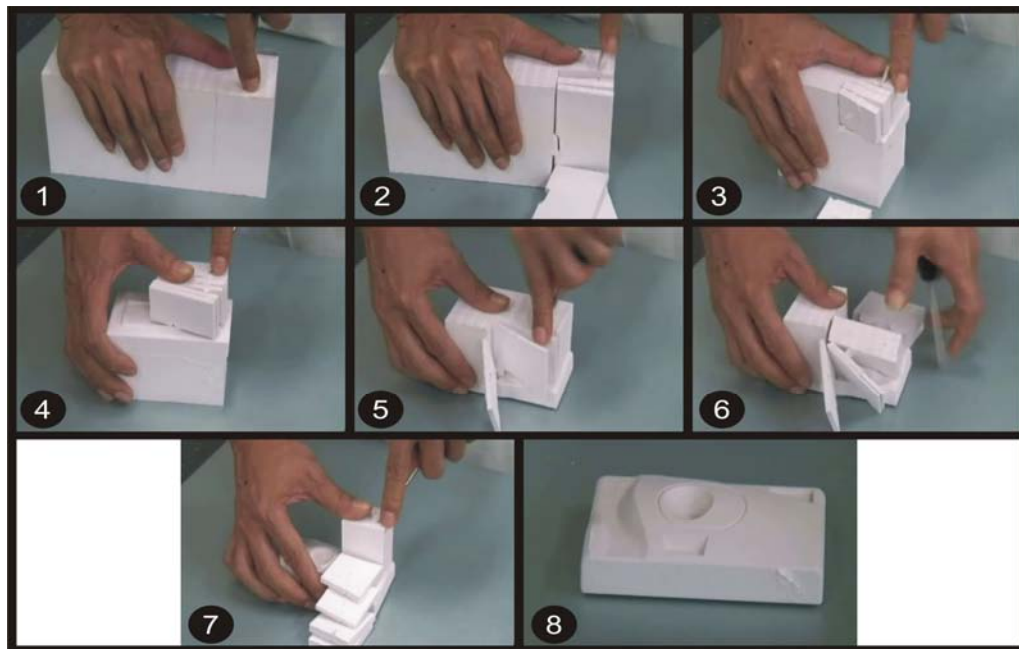


Figura 2.69: Pós-processamento em PLT
Fonte: Adaptação de Kira Corp. (http://www.rapidmockup.com/eg/menu2_5_e.htm)

Além dos processos aqui demonstrados, existem pelo menos de duas a três dezenas de tecnologias de prototipagem rápida que não foram descritas por não serem diretamente aplicáveis para a arquitetura ou por serem menos populares. Existem

diversos centros de pesquisa em universidades, na Europa e nos Estados Unidos, que estão em constante atualização em processos e pesquisas nos diversos campos de atuação da prototipagem rápida. Tecnologias como a *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), da alemã EOS²⁶, que utiliza um feixe de laser para o derretimento de pó metálico com mistura de bronze e aço puro para produção de peças em metal (Wohlers, 2008), ou mesmo tecnologias que utilizam o gelo como matéria-prima, como a *Rapid Freeze Prototyping* (RFP), desenvolvida na universidade de Missouri, têm suas colocações no vasto e emergente mercado da prototipagem rápida. Segundo o Wohlers (2008), os últimos doze meses foram de contínuo progresso.

Apesar de poucos lançamentos de tecnologias e aplicações diretas, todas as aplicações apresentadas, desde equipamentos até uso de novos materiais, agregaram interessantes possibilidades para o futuro da prototipagem rápida em todos os setores onde atua. Ainda segundo Wohlers (2008, p. 21) o paradigma da manufatura rápida foi quebrado. A tabela 3 mostra um resumo das tecnologias aqui apresentadas, com informações relevantes para a escolha do processo a ser utilizado bem como comparações de produtividade, desempenho e custo-benefício.

Tabela 2.3: Resumo das tecnologias apresentadas

Fonte: Adaptação de Volpato et al (2007)

Identificação	FDM	MJM	BenchTop	SLA	POLYJET	SLS	3DP	CAM-LEM	EBM	LOM	PLT
Empresa	Stratasys	3D Systems	SolidScape	3D System	Object	3D Systems	Z Corp	CAMLEM Inc	Arcam	Cubic	Kira
Tamanho máximo da peça (mm)	915x610x915	250x204x204	304x152x152	508x508x584	336x326x200	381x330x457	508x609x406	150x150x150	200x200x180	13x559x508	400x280x300
Necessidade de pós-processamento	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	não	sim	sim	sim
Reutilização de material não processado	não	não	não	não	não	Parcial	sim	não	sim	não	não
Utilização de cores	sim	não	não	sim	não	não	sim	não	não	não	não
Suporte	sim	sim	sim	sim	sim	não	não	não	não	não	não
Velocidade de construção	Baixa	Média-alta	Baixa	Média	Média	Média	Alta	Baixa	Média	Média-Alta	Média-Alta
Precisão	Média	Média-alta	Alta	Alta	Média	Média	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Baixa
Custo do material	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Médio	Médio	Alto	Alto	Baixo	Baixo
Custo do equipamento (US\$)	de 26,000 a 200,000	*	*	250,000	147,500	380,000	de 20,000 a 50,000	*	500,000	*	*

* Não informado pelos fabricantes

Há uma constante atualização de materiais e equipamentos por parte dos fabricantes de modo a transformar as aplicações mais rápidas e com melhor funcionalidade. A expansão, por exemplo, de processos como a sinterização direta de metais tem sido intensificada, paralelamente ao crescimento de tecnologias baseadas em impressoras, tornando seu acesso mais fácil com custos menores. A tabela 4 mostra o número de máquinas vendidas nos últimos 20 anos das empresas e tecnologias citadas nesta pesquisa.

Tabela 2.4: Máquinas comercializadas das empresas citadas nesta pesquisa nos últimos 20 anos

Fonte: Wohlers (2008)

País	Empresa	Tecnologia	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
EUA	Stratasys	FDM				6	9	22	55	121	257	260	262	293	297	277	463	691	1050	1227	1723	2169
	3DSsystems	SLA	32	94	105	44	58	60	94	130	175	278	224	303	387	415	297	202	428	370	238	194
	ZCorp	3DP									1	7	48	105	170	188	210	349	461	687	777	1022
	SolidScape	Jato							22	41	65	152	110	129	127	103	140	128	170	297	339	464
	DTM	SLS					9	19	23	36	51	42	65	73	77	39						
	Cubic	Laminação														2	2	2	2	2	2	1
Japão	Kira	Laminação							5	22	12	20	18	24	23	13	11	16	12	15	17	11
Suécia	Arcam	EBM														2	1	4	5	6	15	15
Israel	Object	Jato														21	46	94	164	235	316	402
Alemanha	EOS	SLS			1	2	9	8	14	39	52	55	39	42	51	52	57	55	54	59	67	79

Preparação para impressão 3D – arquivos STL

Os métodos de impressão tridimensionais requerem um planejamento do processo a ser efetuado, desde a preparação do arquivo digital até o acabamento. A tarefa não é mais o simples envio do modelo CAD 3D para a máquina de impressão. O arquivo deve ser exportado para formatos que possam ser interpretados pelo *software* residente de cada sistema de impressão que corta o objeto em fatias dimensionadas apropriadamente. Assim, após o envio desses formatos para a máquina de impressão, os seus dados são mapeados e convertidos de forma a serem interpretados pelos aplicativos da máquina. A criação desses formatos, considerados “neutros”, como explica Schodek (2005, p. 226), deve-se pelo fato de as plataformas computacionais de

projeto, de diferentes fabricantes, estruturarem seus programas de variadas formas e por utilizarem representações internas distintas para a criação de suas entidades. Os formatos de exportação são, geralmente, baseados em suas entidades (linhas, arcos, superfícies ou sólidos). Alguns até suportam informações não necessariamente geométricas, tais como atributos e propriedades.

Um dos arquivos “neutros” mais comuns é o *Drawing Interchange Format* (DXF) de propriedade da Autodesk. Ele pode suportar entidades de desenho (linhas, arcos, sólidos, etc.), mas não as NURBS e mesmo assim é muito utilizado no intercâmbio entre diversas plataformas vetoriais. Outro formato de exportação é o *Initial Graphics Exchange Specification* (IGES), essencialmente um conjunto de protocolos para a visualização e transferência de arquivos gráficos entre diferentes sistemas CAD (Schodek et al, 2005, p. 227). Esse formato, também neutro, não é associado a nenhuma marca comercial (como é o DXF da Autodesk) e foi adotado como padrão nacional americano, em 1981, e até hoje amplamente suportado pelos maiores fabricantes de sistemas CAD.

Inevitavelmente, o mais utilizado entre os arquivos “neutros” é o *Stereolithography* (STL). Também conhecido como *Standard Triangulation Language* (Linguagem de Triangulação Padrão), os arquivos STL são considerados como um padrão da indústria de equipamentos de prototipagem rápida e implementados na quase totalidade, senão em todos os sistemas CAD, mesmo os mais simples (Volpato et al, 2007, p. 106). Esse tipo de arquivo deve ser originado de modelos sólidos ou superfícies fechadas e caracteriza-se pela triangulação de suas faces e superfícies, empregando um sistema de ordem numérica para descrever os três pontos de definição, evitando que o interior e o exterior da superfície se confundam. A figura 2.70 ilustra um triângulo com a representação numérica de cada coordenada (x, y, z) de seus vértices. O vetor normal representa a direção da superfície externa do triângulo e, conseqüentemente, da parte do modelo que ele representa (Figura 2.71).

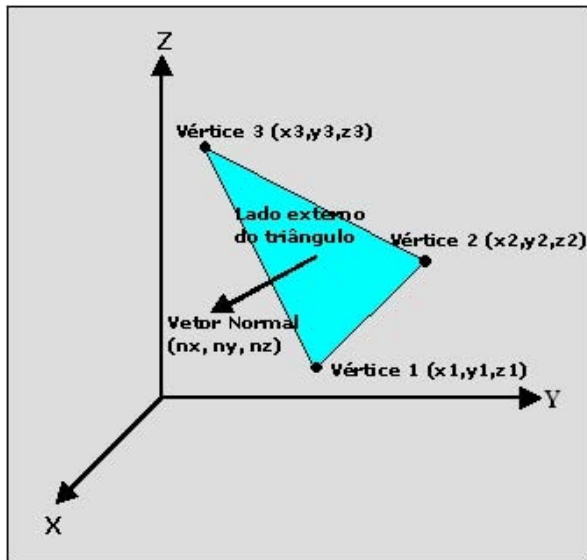


Figura 2.70: Triângulo no formato STL
Fonte: Volpato et al (2007)

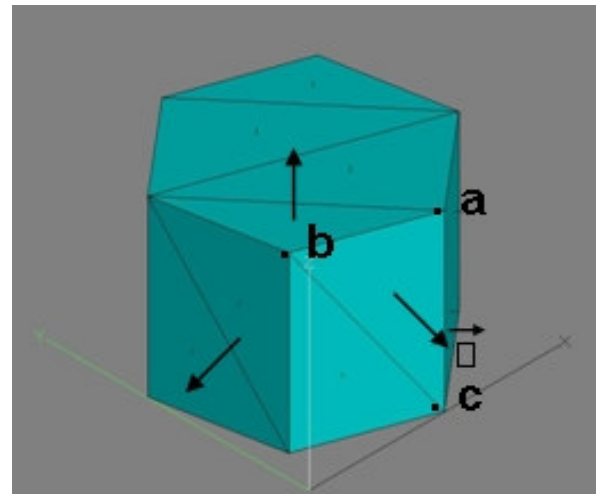


Figura 2.71: Sólido simples representado por triângulos e seus vetores
Fonte: Volpato et al (2007)

Embora muito utilizados e com uma representação relativamente simples, os formatos STL têm alguns problemas que podem comprometer a praticidade de sua utilização. Em primeiro lugar, por não conterem informações topológicas, o que daria uma garantia para a conectividade e consistência da malha, alguns erros de concordância entre os pontos dos triângulos podem ocorrer durante a sua geração. Na prática, isso se traduz como defeitos e distorções na malha final produzida (Figura 2.72), fazendo com que a sua reparação seja uma tarefa onerosa, inclusive, em alguns casos, com a necessidade de utilizar ferramentas especiais para a correção, além de muita paciência. Em segundo lugar, o tamanho do arquivo STL gerado é muito maior que o original modelado em CAD. Isso acontece devido à redundância de dados em um mesmo ponto dos triângulos que se interligam na malha gerada e que Volpato et al (2007) identifica como “redundância”. Quanto maior o número de vértices compartilhados, maior a redundância, ocasionando o aumento do tamanho do arquivo que irá representar, em malha, o arquivo original em CAD (Volpato, 2007, p. 107). A figura 2.73 mostra a representação desse problema.

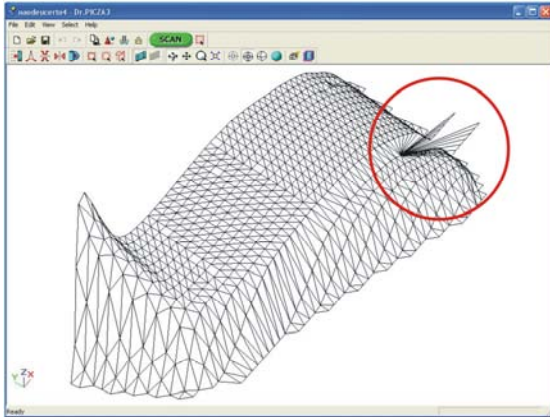


Figura 2.72: Erros na malha STL gerada
Fonte: Regiane Pupo

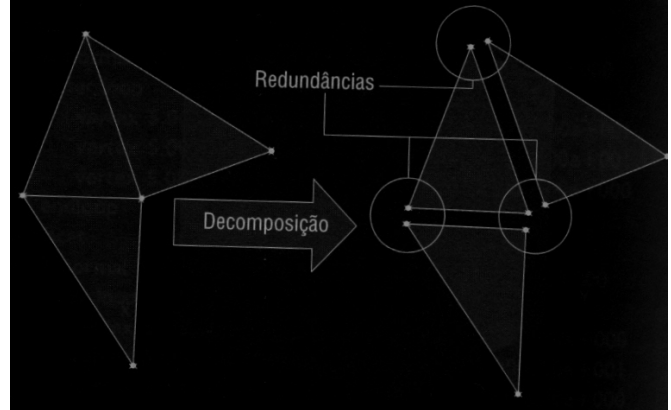


Figura 2.73: Redundância de pontos
Fonte: Volpato et al (2007)

Na geração do arquivo STL, em modelos geométricos com os mesmos parâmetros, as diferenças na malha podem ser significativas em termos de tamanho do arquivo a ser gerado. Isso depende do algoritmo de geração da malha por não haver representação única. A figura 2.74 mostra as representações de quatro esferas obtidas por modelagem sólida e representadas em STL, com parâmetros de controle conforme a tabela 5. A esfera (a) é sólida e não se aplica aos parâmetros de controle do arquivo STL, nem ao controle de número de triângulos. Entre as outras três esferas (a, b e c), em que o número de triângulos é fundamental para a representação precisa do modelo 3D, nota-se que a esfera (a), tem malha de poucos triângulos, o que resulta em alta degradação da geometria. Comparando-se então as esferas (b) e (c), embora a diferença entre o número de triângulos seja substancial (quase 100 vezes mais), a representação de ambas não priva nenhuma delas da qualidade final da impressão. Ou seja, mesmo com uma significativa diminuição no número de triângulos, e consequentemente, considerável redução no tamanho do arquivo, a esfera (b) serviria para os propósitos da impressão 3D sem maiores problemas. Isso mostra que, muitas vezes, não há a necessidade de utilização de parâmetros muito restritos, o que somente causa excessiva utilização de memória computacional para trabalhar os arquivos.

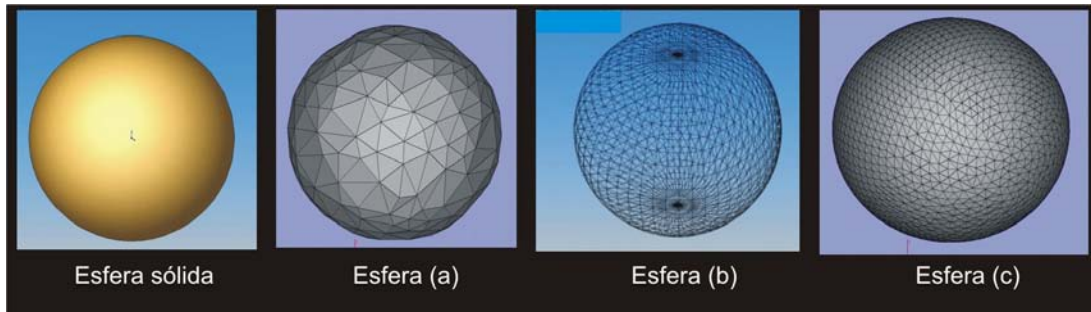


Figura 2.74: Parâmetros de controle da malha
 Fonte: Adaptação de Volpato (2007, pp. 117)

Tabela 2.5: Parâmetros de controle dos arquivos da figura 76
 Fonte: Volpato (2007, p. 117)

Modelo	Esfera Sólida	Esfera STL (a)		Esfera STL (b)		Esfera STL (c)	
Parâmetros de controle STL	não aplicável	Ângulo (Graus)	Flecha (mm)	Ângulo (Graus)	Flecha (mm)	Ângulo (Graus)	Flecha (mm)
		30,00	0,103	5	0,05	0,5	0,0042
Número de triângulos	não aplicável	2.352		5.040		516.960	
Tamanho do Arquivo (Kbytes)	120	115		247		25.243	

2.2.2. Corte a laser

Outra maneira de se produzir maquetes, embora não aceita como prototipagem rápida por alguns autores, são as máquinas de corte a laser (*High Speed Cutting* – corte em alta velocidade). Esta tecnologia, muito utilizada para estudos preliminares, consiste no corte automatizado de placas de vários materiais, dentre eles a madeira, o acrílico, o papelão e a cortiça, com alta precisão e velocidade, os quais são

posteriormente “empilhados” manualmente para formar o modelo ou o protótipo desejado.

As diferenças entre as etapas de impressão dos processos aditivos e de corte a laser já se destacam desde o início do processo, como mostra a figura 2.75 com a comparação dos dois sistemas. A ilustração apresenta na coluna da esquerda as etapas dos processos de adição por camadas (3DP, FDM, SLA, SLS, etc.) e na coluna da direita as etapas do processo de corte a laser. Anteriormente ao início da produção em ambos os processos é interessante salientar a importância do “projeto de produção da maquete” (distinto do projeto de arquitetura), para cada técnica utilizada. Esse projeto deve conter algumas diretrizes e características inerentes a cada processo, seguindo especificações pontuais como escalas, espessuras, tamanhos máximos e mínimos, materiais e potências a serem utilizados (no caso do corte a laser). Nos processos de adição, é indispensável, primeiramente, que se estabeleça a escala de impressão, de acordo com o tamanho máximo que a máquina suporte. Nesse momento, devido à redução ou aumento do tamanho do objeto a ser impresso, deve-se levar em consideração que as espessuras das paredes do objeto também se ajustarão às escalas escolhidas. Isso pode ser um fator primordial para o sucesso da peça prototipada, visto que paredes muito finas deixam o protótipo muito frágil, e, portanto passível de quebras e falta de resistência.

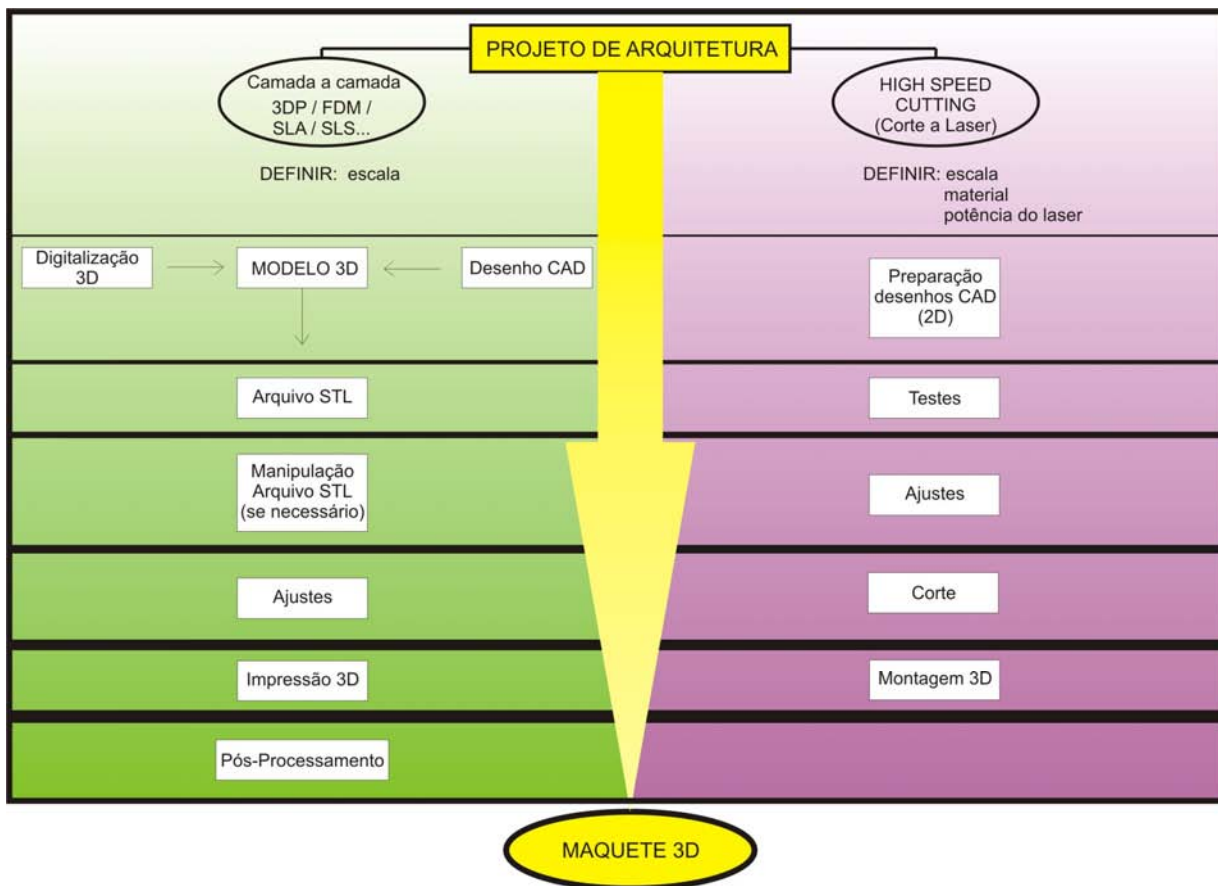


Figura 2.75: Comparação entre 3DP e corte a laser
Arte: Regiane Pupo

Já na técnica de corte a laser, as primeiras providências devem ser a escala do objeto a ser cortado, o cuidado com os limites máximos do equipamento, o ajuste das potências do feixe de laser associadas ao material a ser cortado. Em outras palavras, a densidade de cada material (e sua espessura) requer uma potência de intensidade específica do feixe de laser para que ele corte ou vinque o material.

Enquanto os processos de adição de camadas necessitam de um modelo digital tridimensional, obtido pela modelagem no próprio *software* CAD ou pela digitalização, a tecnologia a laser inicia o processo por desenhos bidimensionais. Esta pode ser considerada uma das facilidades desse sistema que ainda agrega a vantagem de ter todos os ajustes efetuados diretamente na tela de impressão do *software* utilizado (AutoCAD ou Corel), por meio de um *driver* fornecido pelo fabricante. A figura

2.76 mostra a interface de impressão do *driver* de uma cortadora a laser (Universal Systems, X-60), em que são ajustadas as potências e velocidades associadas a cada cor do desenho 2D.

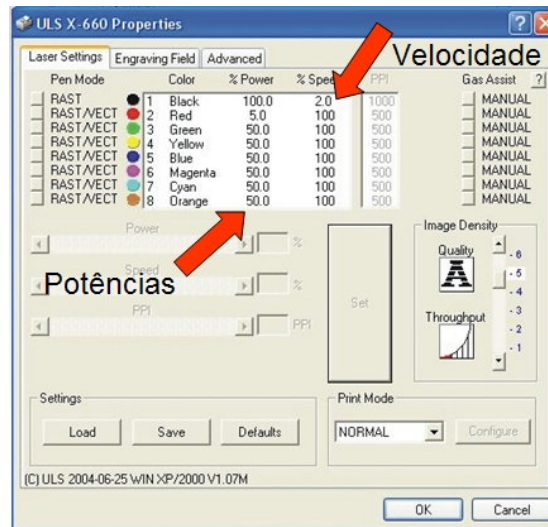


Figura 2.76: Interface de impressão da cortadora a laser X-660, da Universal Systems

A partir daí, a impressão executada pelos processos de adição transcorre de acordo com a técnica escolhida, mas sempre com uma seqüência de impressão que se inicia com a preparação do arquivo STL, sua manipulação (se necessário), finalizando com o pós-processamento da peça prototipada. Na tecnologia de corte a laser, alguns testes e ajustes devem ser feitos de acordo com o material utilizado e condições do equipamento, seguindo com o procedimento de corte e montagem do objeto de acordo com o planejamento pré-estabelecido. É extremamente importante e até aconselhável pelo próprio fabricante desse tipo de equipamento que sistemas de ventilação e exaustão sejam instalados no local de funcionamento dessas máquinas, visto que alguns materiais de corte são altamente combustíveis à medida que entram em contato com o feixe de laser.

A comparação entre os dois sistemas, o de adição de camadas e o de corte a laser, pôde demonstrar que, no primeiro, o produto final é um objeto 3D e no segundo,

há a necessidade de montagem do objeto com as partes cortadas ou vincadas. Não cabe aqui avaliar qual das técnicas é a mais indicada para a prática da arquitetura, ou qual das duas responde à necessidade imediata do arquiteto, mesmo porque, cada etapa de projeto requer uma produção específica. O que vale ressaltar, porém, é que em ambos os casos, um pré-planejamento do modelo tridimensional que se quer obter é absolutamente necessário. As novas tecnologias passam a demandar, além do projeto de arquitetura, um projeto exclusivo para a confecção do modelo, em que todos os parâmetros e variáveis devem ser considerados e importantes para o resultado satisfatório do protótipo.

Como visto, as cortadoras a laser produzem objetos 2D para a posterior montagem das peças e obtenção do objeto em sua forma tridimensional. Entretanto, os *software* mais utilizados hoje por arquitetos durante o processo de projeto, geralmente, produzem modelos digitais 3D com muita facilidade, garantindo uma maior compreensão e interação entre o arquiteto e sua obra. O desenho 2D, atualmente, é encarado como mera documentação, para ser enviada à obra. Mesmo assim, os equipamentos de corte somente aceitam desenhos 2D. Com isso, há a necessidade de planificar os desenhos 3D para que possam ser enviados à cortadora a laser. A planificação de desenhos 3D, ou seja, a transformação de 3D em 2D pode então ser obtida por meio de *software* específicos, como é o caso do Pepakura Designer²⁷. Desenvolvido na Universidade de Tóquio, o *Pepakura* consistiu originalmente em um método para transformar brinquedos modelados (sólidos) no computador em modelos para serem montados em papel. Segundo Vieira (2007), o *Pepakura* racionaliza o modelo 3D, une as superfícies adjacentes, planifica e subdivide o modelo 3D, desdobrando-o em partes correspondentes ao modelo original. O programa também especifica as linhas de corte, de vinco e as abas de colagem em cada uma das peças para que sejam posteriormente montadas. O modelo 2D, depois de planificado, pode ser exportado para os principais programas utilizados por arquitetos, em extensões como DXF (AutoCAD, Rhino, CorelDraw) e 3DS (3D Studio Max). A partir destes

²⁷

<http://www.tamasoft.co.jp/pepakura-en/>

software então, as cortadoras a laser podem ser utilizadas. A figura 2.77 mostra uma experiência feita com o Pepakura, na planificação do projeto do museu Guggenheim, em Bilbao, do arquiteto Frank Gehry, para a dissertação de mestrado na FEC, intitulada “Produção digital de maquetes arquitetônicas: um estudo exploratório” (VIEIRA, 2007).

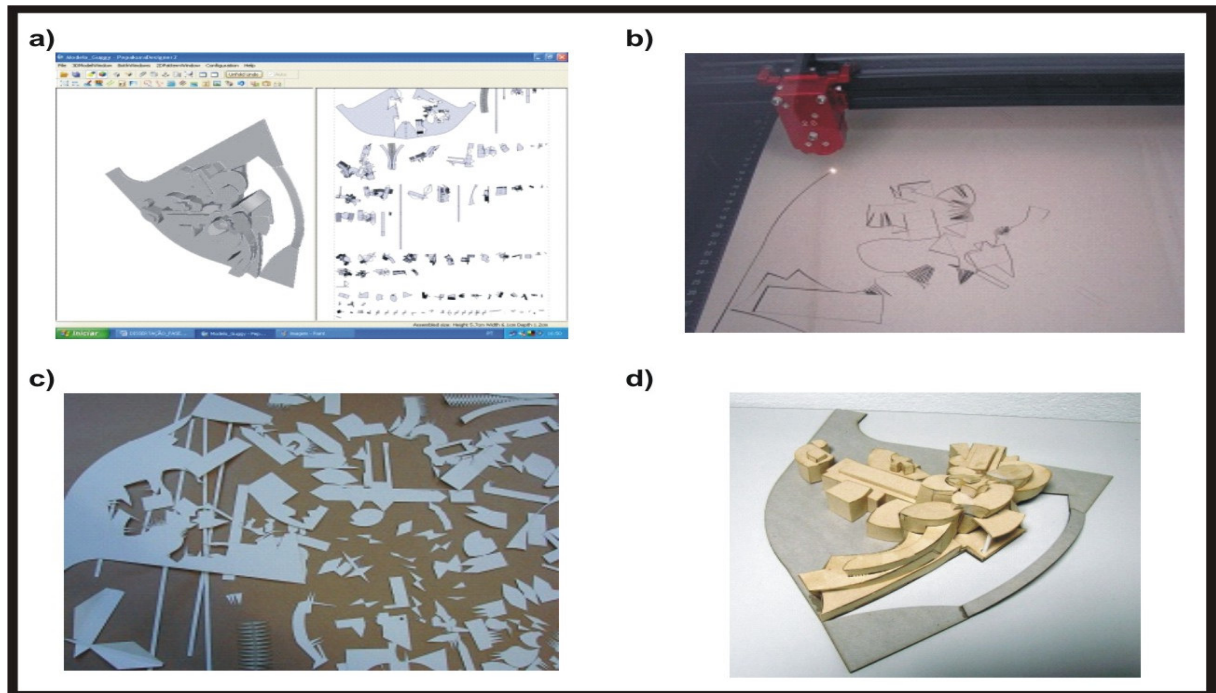


Figura 2.77: Experiência com o *software* Pepakura
a) Planificação software Pepakura, b) corte a laser, c) montagem, d) Modelo acabado
Fonte: Vieira (2007, p. 100)

2.2.3. *Milling* (Fresas) – CNC

A prototipagem digital ainda é aplicada também na produção de maquetes com a utilização de equipamento de fresagem (*milling*) com máquinas CNC. Estes equipamentos, que trabalham com métodos subtrativos de produção automatizada, utilizam fresas para desbastar blocos ou chapas de material, como visto anteriormente. Existem no mercado diferentes marcas, tamanhos e modelos para diversas aplicações

e escalas de produção de protótipos que têm como um dos objetivos a avaliação de projeto. Essas avaliações podem testar a funcionalidade do projeto, efetuar testes de conforto ambiental (acústica, iluminação e ventilação) ou ainda proporcionar testes ergonômicos quando cabível, utilizando materiais semelhantes ou do próprio elemento projetado. O tamanho dos protótipos desenvolvidos vão desde escalas menores, limitadas ao tamanho dos equipamentos, como é o caso da Modela Miller (Rolland) e da Denford Miller, (Figuras 2.78 e 2.79, respectivamente) até em escala 1:1.



Figura 2.78: Fresadora Modela Miller com exemplos de aplicação em madeira
Fonte: Digital Design Fabrication Group, 2006 (www.ddf.mit)



Figura 2.79: Fresadora Denford Miller com exemplos de aplicação em metal
Fonte: Digital Design Fabrication Group, 2006 (www.ddf.mit)

Um exemplo de utilização com diversificadas ferramentas de apoio ao projeto é o Disney Concert Hall (1998) de Frank Gehry (Figura 2.80). Antes da utilização de ferramentas computacionais, múltiplos e repetidos testes com modelos físicos foram

aplicados com diferentes parâmetros com o objetivo de que “os objetos físicos pudessem definir e agregar a intenção formal do projeto ao passo que é desenvolvido ao longo do processo” (SHELDEN, 2002). A inovação aqui aplicada foi a idéia de desenvolver uma configuração acusticamente ideal como geradora de forma do prédio em que o estudo externo do projeto refletia os testes acústicos efetuados na forma interior (GLYMPH 2003 apud GANE, 2004, p. 39). A figura 2.81 mostra um protótipo executado em escala 1:10 construído para este fim.



Figura 2.80: Maquete Disney Concert Hall (1998)
Frank Gehry
Fonte: Shelden (2003, p197)

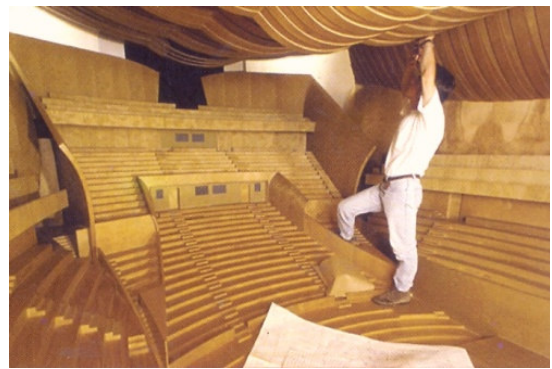


Figura 2.81: Maquete Disney Concert Hall (1998)
para testes acústicos
(escala 1:10)
Fonte: Kolarevic (2003, p. 107)

2.3. Fabricação Digital

Não há dúvidas que a era digital revolucionou e reconfigurou a relação entre concepção e produção de projeto. Um elo não mais desassociado entre o que pode ser concebido e o que pode ser construído se formou. Os processos de trabalho nas construções têm mudado substancialmente desde a introdução dos primeiros sistemas CAD/CAM para arquitetura. Deve-se considerar que com a constante utilização dos processos de fabricação digital, a diferenciação entre a maquete e o elemento

construtivo é cada vez menor devido à utilização da mesma informação para a construção do modelo e para a peça final.

Existem diversos métodos de produção digital que não são necessariamente baseados em sistemas aditivos e também destinados à construção de produtos finais. Esses são em geral chamados genericamente de sistemas de fabricação digital (*Digital Fabrication*) e incluem as cortadoras a jato d água e a laser e diversos tipos de equipamentos CNC, sugerindo a transferência de dados de um programa de modelagem 3D para a fabricação direta com técnicas subtrativas, formativas ou aditivas. Suas aplicações na arquitetura e construção são as mais variadas e vão desde a produção de fôrmas para concreto armado com formas especiais até a produção de ornamentos esculpidos em pedra que são utilizados como “próteses” arquitetônicas em obras de restauro. Segundo Kolarevic (2005, apud Oosterhuis, 2005), a fabricação digital permite resultados variáveis e não repetitivos. Igualmente à prototipagem rápida, induz ao conceito de *mass-customization* (customização em massa) permitindo o desenvolvimento de sistemas construtivos não padronizados por meio de diferenciações seriais e variações digitalmente controladas.

Segundo Schodek (2004), o processo da fabricação digital se desenvolve basicamente em dois passos: (1) analisando as informações estruturais para todas as partes do projeto com a utilização de *software* CAM e (2) traduzindo toda a informação analisada anteriormente para a máquina CNC (Schodek, 2005). A máquina, controlada numericamente por computador, vai reproduzir fisicamente em um material o modelo, na forma de instruções, que dependerão dos diferentes processos de fabricação a serem utilizados. Pottman et al (2008) afirmam que as raízes da fabricação digital estão nos anos 50 quando a invenção das máquinas de controle numérico criaram uma demanda de formas mais sofisticadas de manuseá-las do que simplesmente a entrada de dados manualmente. A primeira tentativa de transformar a forma em saída numérica para esse tipo de máquina era baseada em um rastreamento de desenhos para

digitalizar a informação. Ficou claro rapidamente que a maneira matemática de descrever a geometria era necessária para qualquer progresso real à medida que iam surgindo novas geometrias com curvas e formas não euclidianas, colaborando para o uso mais eficiente das máquinas de controle numérico, voltado à maquetes e elementos construtivos.

Hoje, os projetos não são somente criados digitalmente, mas também produzidos digitalmente por processos de fabricação digital, numericamente controlados por computador (CNC), e chamados de processos “*file-to-factory*”. A tradução literal do processo “*file-to-factory*” como sendo “do arquivo para a fábrica”, se caracteriza quando o modelo digital 3D se comunica diretamente com as máquinas de corte programáveis. Segundo Oosterhuis (2005), o processo *file-to-factory* se refere a uma mesclagem entre o processo de projeto e a fabricação, envolvendo a transferência direta de dados a partir de um *software* 3D para uma máquina CNC. Estratégias de projeto e fabricação digital são empregadas e baseadas em conceitos computacionais.

Como exemplo do processo *file-to-factory*, o projeto *Web of North-Holland* (Figura 2.82) foi construído em um primeiro momento em 2002, na exposição *Floriade World em Haarlemmermeerpolder*, na Holanda e mais tarde, em 2006, já rebatizado de *iWEB*, nas dependências da faculdade de arquitetura da Universidade de Tecnologia de Delft, também na Holanda.



Figura 2.82: Web of North-Holland
Fonte: <http://www.oosterhuis.nl/quickstart/index.php?id=457>

Assinado pelo escritório holandês ONL - Oosterhuis & Lénárd, o *iWEB* foi projetado para servir ao grupo de pesquisa *Hyperbody Research Group*, coordenado pelo professor Kas Oosterhuis, da Universidade de Delft. Seu processo de projeto se iniciou com um modelo digital, composto por seis icosaedros, que simultaneamente foram enviados a uma máquina CNC, o que permitiu eventuais experimentações formais tais como ajustes da forma por meio de técnicas convencionais. Usando técnicas de engenharia reversa, o modelo físico foi digitalizado e posteriormente manipulado no computador. Nesta fase, o icosaedro foi mapeado em superfícies NURBS com o objetivo de definir uma estrutura genérica. Depois de manipulado de acordo com os procedimentos espaciais e formais, a forma geométrica foi definida e passou a representar a estrutura inicial. Nesse momento foi estabelecida uma matriz espacial para uma futura geração dos dados CNC para a fabricação digital. Todo esse procedimento caracterizou o processo *file-to-factory* pela transição direta entre o arquivo gerado digitalmente e sua produção automatizada.

Segundo Kolarevic (2003), um dos primeiros projetos a serem desenvolvidos e produzidos digitalmente foi o *Fish Sculpture* (Figura 2.83), projetado para a entrada da Vila Olímpica em Barcelona (1992). As limitações de custo e tempo do projeto conduziram a equipe de Frank Gehry, autora do projeto, na procura de um *software* que fosse útil não somente à complexa geometria do projeto, mas também à sua manufatura, assegurando o alto grau de precisão na fabricação de sua estrutura e montagem. Depois de várias tentativas, a solução foi a utilização do *software* CATIA²⁸. Foram criados modelos digitais 3D no desenvolvimento do projeto para análises estruturais e como fonte de informação para a construção da “escultura”, que mede aproximadamente 60 metros de comprimento e 40 metros de altura, além de diversos modelos físicos. O primeiro deles, depois dos croquis iniciais, tinha um metro de comprimento, que posteriormente foi substituído por um modelo de papel cortado na cortadora a laser e finalmente um *mock-up*, em escala real, para testes do processo de construção e para determinar a flexibilidade máxima da estrutura e curvaturas da

²⁸ CATIA – Software desenvolvido por Dessault Systemes (<http://www.3ds.com/products/catia/>)

superfície. Kolarevic (2005, p. 31) salienta que foi nesse momento que “o condutor da revolução digital para a arquitetura finalmente havia chegado”.

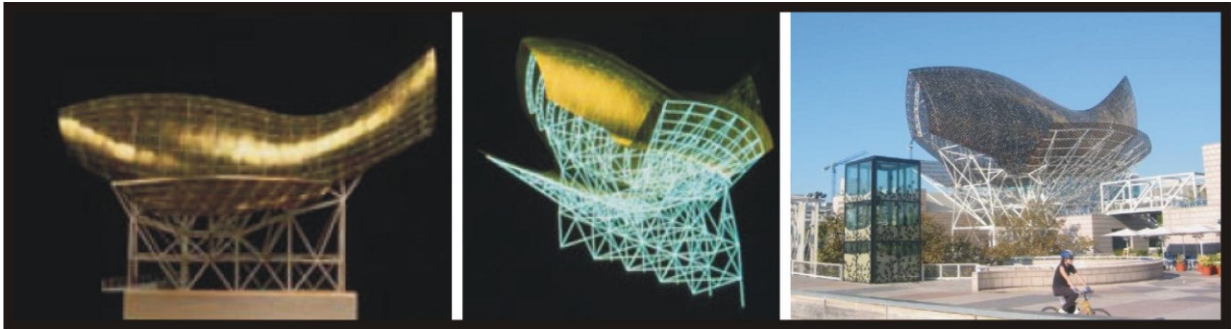


Figura 2.83: Projeto Fish Sculpture, Frank Gehry
Fonte: Shelden (2002)

Essas novas formas geométricas, as chamadas “*freeform geometries*” ou geometria de formas livres, têm transformado a prototipagem rápida e a fabricação digital especialmente importantes por serem capazes de produzir um objeto físico, preciso, de formas compostas de geometrias complexas, a partir de dados digitais; uma tarefa muito mais difícil do que com geometrias retangulares. As formas livres oferecem muito mais flexibilidade do que superfícies clássicas como cilíndricas, cônicas ou esféricas, atribuindo um grande desafio para a arquitetura e engenharia. Muitos arquitetos já fazem uso das formas livres há séculos, mas foi somente no século XIX que puderam realmente concretizar a expressão da forma e estilo, devido à industrialização e aperfeiçoamento de materiais de construção como o aço, o ferro e o concreto armado (Pottmann, 2007, p. 362). Antonio Gaudi, como já citado, alcançou o entendimento entre o equilíbrio e a forma livre com a ajuda de modelos físicos. A figura 2.84, com a Casa Milà (1905-1907) e a Igreja Sagrada Família (1882-hoje) podem exemplificar a utilização das formas livres por Gaudi. Um pouco mais tarde, em 1950-59, Frederick Kiesler, com a *Endless House* (Figura 2.85), também demonstrava interesse nas formas livres e “superfícies sem fim”, cujos conceitos e idéias são ainda tão ricos e polêmicas quanto a quarenta anos atrás.



Figura 2.84: Formas livres criadas por Gaudi
Acima: Casa Milà (1905-1907) /
À direita: Igreja Sagrada Família
Barcelona, Espanha
Fotos: Regiane Pupo



Figura 2.85: Desenhos e modelo físico da “Endless House” por Frederick Kiesler (1950-59)
Fonte: Kreissel (2003)

Outro termo, “*freeform construction*”, a construção de formas livres, vem sendo utilizado para caracterizar as recentes construções que estão revolucionando os processos construtivos até então utilizados, trazendo novas possibilidades nunca antes imagináveis. O processo combina projeto, construção e manutenção em uma operação linear com o objetivo de produzir estruturas e componentes que desafiam qualquer equipamento de última geração, permitindo sua construção em qualquer cenário. As técnicas de fabricação digital, no passado, consideradas experimentos na geração abstrata da forma, são hoje fundamentais na redefinição de metodologias da prática da arquitetura que contam com a ligação entre a modelagem e a produção digitais (Klinger, 2007).

Os desafios pelos quais a geometria passa com o uso de equipamentos de fabricação digital são inúmeros. Como as máquinas CNC repassam os dados derivados dos modelos digitais para controlar seus movimentos objetivando a produção das partes, os limites do equipamento determinam algumas possibilidades de produção do modelo. Isto quer dizer que fatores como número de eixos e tamanho da plataforma de corte estão diretamente ligados à qualidade final da peça, ao tempo de execução e à escala de produção. Quanto ao número de eixos, entretanto, as máquinas CNC usadas para a fabricação de elementos arquitetônicos dependem dos DOF (*Degrees of Freedom* – graus de liberdade) de cada modelo. Segundo Pottman et al (2007, p. 579), os DOF são definições geométricas de liberdade de movimentos tanto ao longo de um eixo no espaço, quanto na rotação em torno do eixo no espaço: três graus para movimentos nas direções X, Y e Z e três graus para a rotação em torno desses eixos. Isso significa que máquinas com menor número de eixos, e conseqüentemente um número menor de DOF, oferecem pouquíssima flexibilidade na descrição de geometrias complexas no espaço. Mesmo assim, não significa que as de maior número de eixos são sempre as melhores e as mais indicadas. Como existe no mercado uma gama muito grande de modelos, tamanhos e potências desse tipo de equipamento, é primordial que se considere, primeiramente, qual a sua utilização efetiva antes da aquisição. Essa recomendação é muito importante quando se compara modelos a serem prototipados em impressoras 3D e os equipamentos CNC. Nas primeiras, como já visto, qualquer tipo de geometria pode ser produzida, inclusive aquelas com fendas ou furos ou com formas totalmente irregulares. Já com relação às máquinas CNC, mesmo utilizando um equipamento completo de seis eixos e um número máximo de DOF, não conseguiria produzir a mesma peça, devido às colisões da fresa com o próprio objeto que a máquina sofreria ao tentar remover material de partes internas. Portanto, os DOF associados ao número de eixos não são os únicos fatores que determinam o sucesso de um equipamento CNC; a combinação entre técnicas de fabricação e geometria que vai permitir a construção física de formas abstratas.

Quanto ao tamanho da plataforma, muitas peças não conseguem ser produzidas de uma só vez, por não se ajustarem ao tamanho da plataforma, devendo ser divididas em partes para posterior montagem, o que pode ser uma tarefa difícil em canteiros de obras menos organizados. Um exemplo de sucesso dessa aplicação é o projeto *Der Neue Zollhof* (Figura 2.86), construído entre 1996 e 1999, em Dusseldorf, na Alemanha, por Frank Gehry & Partners, que utiliza o uso da fabricação digital e do modelo físico em várias etapas do projeto. Formado por três volumes diferentes, chamados de A, B e C, o complexo tem, aproximadamente, 1500 janelas. Cada uma teve de ser ajustada pelo computador na posição correta nas fachadas, chegando ao final com um total de mais de 250 variações de elementos construtivos.



Figura 2.86: Projeto Der Neue Zollhof (1996-99), Dusseldorf, Alemanha, Frank O. Gehry
Fonte: Schmal (2001)

No complexo B, que resultou em um maior número de variações projetuais, foram utilizadas as técnicas de fabricação digital para a construção de elementos construtivos, no caso os painéis de fachada, desde sua concepção até a colocação na obra. Muitas vezes, os componentes fabricados têm graus de complexidade tão altos que podem somente ser resolvidos por meio da representação física 3D. Segundo Schmal (2001), para a manufatura desses elementos, alguns protótipos foram gerados anteriormente à fabricação dos painéis para garantir as propriedades dos materiais e o uso das ferramentas compatíveis. Na verdade, muitos dos exemplos de fabricação digital são também como intervenções em escala pequena e aplicações em fachadas

com elementos construtivos. Muitas vezes, um estudo em escala reduzida serve como prova de conceito para a troca de informação digital. No caso de os elementos construtivos serem muito variados em suas geometrias, como é o caso desse projeto, então, a partir do momento que os sistemas estruturais e de revestimento são determinados, é necessário alguma técnica para assegurar que serão manufaturados fielmente e com um custo mínimo de fabricação.

A Figura 2.87 ilustra um estudo de elementos de fachada do projeto *Der Neue Zollhof*. Nesse exemplo, a prototipagem rápida auxiliou no processo de criação da forma pretendida. A partir de um modelo digital, a peça foi testada em um modelo físico, prototipado em escala reduzida e o resultado final se caracterizou como um modelo digital da fachada com o detalhe do elemento construtivo escolhido, que posteriormente foi produzido em CNC.



Figura 2.87: Estudo de um elemento de fachada.
Projeto Der Neue Zollhof, em Dusseldorf, Alemanha, 2000, Frank O. Gehry
Fonte: Schmal (2001, pp. 99)

Cada elemento construtivo, nesse caso um painel de fachada, foi produzido individualmente, com moldes em espuma de poliuretano expandido, “esculpidos” por uma fresa CNC de alta velocidade, a partir de um modelo digital, gerado por programas de CNC. Entretanto, alguns deles se mostraram maiores que a plataforma de corte do equipamento CNC, fazendo com que a produção das fôrmas fosse realizada em partes e em momentos distintos, obedecendo os limites máximos suportados pelo equipamento de fabricação. Isso implicou na divisão da geometria criada, com

consequente necessidade de posterior montagem. Segundo Pottmann et al (2008) esse procedimento agrega desafios na concepção da geometria e nos procedimentos de montagem, fator muito importante durante todo o processo, hoje. A figura 2.88 mostra a seqüência de montagem de um desses painéis no local da obra.



Figura 2.88: Seqüência de montagem de um painel de fachada, Projeto Der Neue Zollhof, Dusseldorf, Alemanha, Frank Gehry
Fonte: Schmal (2001)

Posteriormente, o revestimento, que consiste de material isolante e aço inoxidável, foi aplicado definindo a espessura das paredes de concreto. O posicionamento e alinhamento das partes na obra são freqüentemente efetuados por equipamentos de medição a laser, estendendo assim o processo digital dentro do processo construtivo (Szalapaj, 2005). A figura 2.89 ilustra o processo de fabricação digital do elemento construtivo do complexo B, mostrado acima, em nove etapas:

1. Concepção da forma arquitetônica;
2. Construção do molde, em poliestireno, do elemento construtivo, em fresa CNC;
3. Preparação do molde para a aplicação de concreto;
4. Aplicação da ferragem e concretagem;
5. Acabamento;
6. Desmoldagem;
7. Elementos construtivos prontos para serem inseridos na obra;
8. Localização dos elementos construtivos;
9. Finalização.

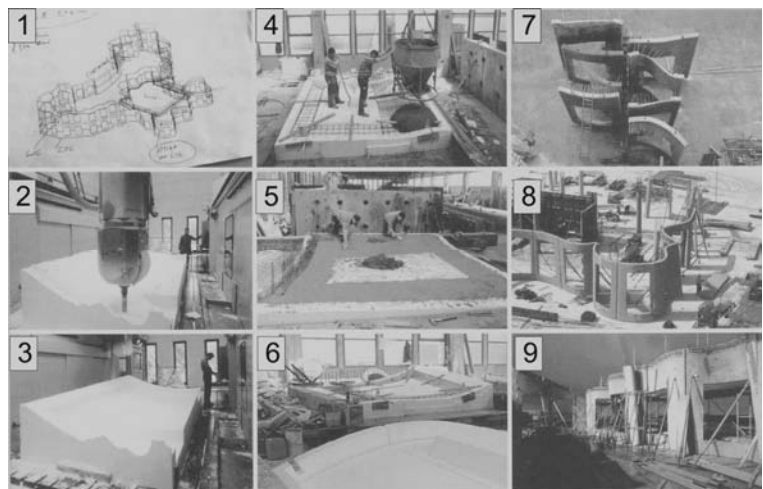


Figura 2.89: Processo de fabricação digital - (Frank Gehry, 2000)
Fonte: Schmal (2001)

A decomposição de superfícies curvas complexas em superfícies individuais facilita a representação em partes que podem ser fabricadas separadamente e então unidas para formar uma fachada ou qualquer outra composição. Como visto no projeto *Der Neue Zollhof*, essa decomposição em partes deve ser prevista quando o objeto não cabe na plataforma de corte. Entretanto, muitas vezes, as peças já devem ser projetadas em partes, devido ao transporte até o local da obra, pelo tamanho das aberturas (portas e janelas) de acesso e pela facilidade de montagem.

O projeto de interiores de um apartamento em Nova York (Figura 2.90), projetado pelo escritório Kolatan/MacDonald, de 1997, talvez tenha sido o primeiro caso de uso de CNC para este fim. Os moldes para os móveis foram produzidos com esta tecnologia, para cortar vigas de madeira e alumínio que serviram como estrutura e suporte. Os espaços vazios entre as vigas foram preenchidos com espuma e as rebarbas aparadas (Figura 2.91). Para o acabamento, foi utilizada uma resina acrílica colorida que recebeu polimento tornando a superfície lisa e brilhante. Todas as peças foram dimensionadas, durante o projeto, em conformidade com as medidas máximas de portas, janelas, corredores e elevadores do apartamento, garantindo seu acesso (Schmal, 2001). O mais interessante é que, no local da produção dos móveis, foi elaborado um *mock-up*, em escala 1:1, com características idênticas ao local real da obra e à medida que as peças iam sendo acabadas, eram posicionadas neste modelo, numeradas e embaladas para o transporte, facilitando a montagem final.



Figura 2.90: Projeto de interiores produzido com CNC
 Fonte: Kolatan/Mac Donald Studio, Nova York, EUA
http://www.moma.org/exhibitions/1999/un-privatehouse/project_17.html



Figura 2.91: Projeto de interiores produzido com CNC – peças sem acabamento
 Fonte: Kolatan/Mac Donald Studio, Nova York, EUA
http://www.moma.org/exhibitions/1999/un-privatehouse/project_17.html

O trabalho do arquiteto Douglas Garofalo, estabelecido em Chicago, nos Estados Unidos, já foi reconhecido como parte da “Nova Vanguarda”, pela revista *Architectural Record*, devido ao esforço em aliar a fabricação digital ao processo de projeto. No exemplo ilustrado na figura 2.92, a *Manilow Residence*, a equipe da Garofalo Architects iniciou o projeto utilizando o sistema CAD da empresa Bentley, o MicroStation, chegando à geometria final da superfície com o *software* de animação Maya. Depois de dimensionada, para obedecer ao tamanho das placas de madeira onde seria cortada, a estrutura foi exportada para um programa de “*nesting*”, o *RouterCim*, que otimiza a utilização da madeira, distribuindo os componentes na área

de corte, de forma compacta, reduzindo a perda de material. Depois de cortadas em uma fresa de três eixos, as peças foram então encaminhadas à obra, devidamente identificadas, para a montagem. A estrutura curva foi então recoberta com placas de madeira, coladas e parafusadas, que serviram como base para a aplicação do acabamento com membranas de titânio, em formato de losango, à prova de água.



Figura 2.92: Projeto Manilow Residence, Garofalo Architects
Fonte: Chaszar (2006, p. 198)

Com isso, as técnicas de fabricação digital e a escolha de materiais, do ponto de vista do projeto, passam a ter um papel importante durante o processo de projeto e na estética do produto final. Pottmann et al (2008, p. 572) explica que “a escolha da técnica de fabricação pode levar à uma estética particular devido à interpretação da geometria, necessária para produzir as partes. Essa interpretação pode ter grande influência no desenvolvimento do projeto”. Em outras palavras, a orientação do eixo das características geométricas do modelo a ser construído pode demonstrar variações na sua forma final (Figura 2.93). Isso significa que é decisão do arquiteto de que forma vai “fatiar” o objeto para ser enviado ao equipamento de corte, para posterior empilhamento das peças. Dessa forma, pode-se imaginar como seria diferente o projeto do mobiliário ilustrado na figura 2.94, o “Sitscape”, do escritório alemão Hackenbroich, caso o projeto tivesse sido elaborado com um eixo de corte diferente do escolhido para a fabricação. Nesse caso, os elementos estruturais principais são as seções de madeira laminada, que foram digitalmente cortadas em equipamento CNC. A estrutura de conexão entre as peças é de aço e alumínio, pouco visíveis.

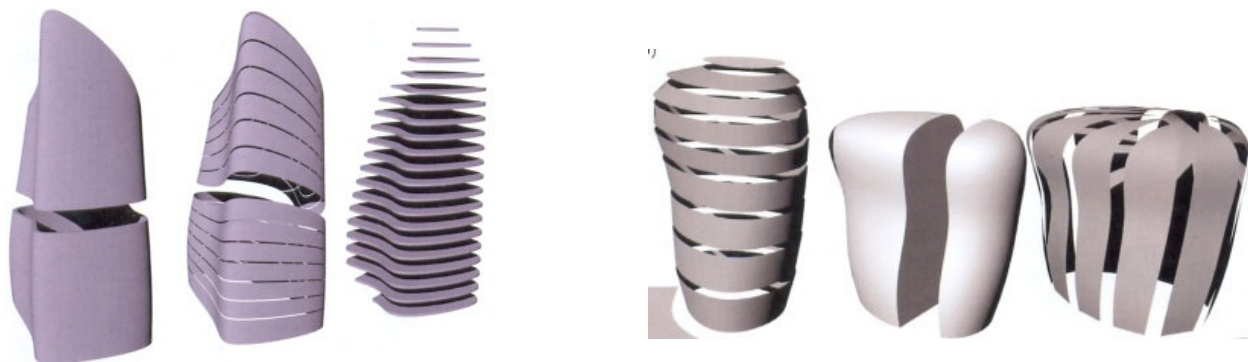


Figura 2.93: Fatiamiento de sólidos
Fonte: Pottmann (2007, p.572)



Figura 2.94: Projeto "Sitscape", Hackenbroich Arquitetos, Alemanha, 2006
Fonte: http://www.hackenbroich.com/Main_EN/Projects_EN/Sitscape_01_EN/sitscape_01_en.html

Na arquitetura e no design, o aumento na utilização de técnicas de fabricação digital tem alertado arquitetos quanto à estética de seus projetos. Como exemplo da influência do equipamento ou técnica utilizados na aparência do projeto, o arquiteto

americano Greg Lynn²⁹, no projeto de um conjunto de café e chá especialmente concebido para as lojas Alessi, utilizou as marcas de corte provenientes da conformação das placas de titânio durante a produção, como aspecto estético do processo projetual. A geometria da superfície das peças é caracterizada por linhas, estampadas no material, as quais ligam o produto à sua forma de produção. Cada peça tem um desenho único, proveniente do traçado da fresa durante o processo de produção (figura 2.95), que utilizou folhas finas de titânio.

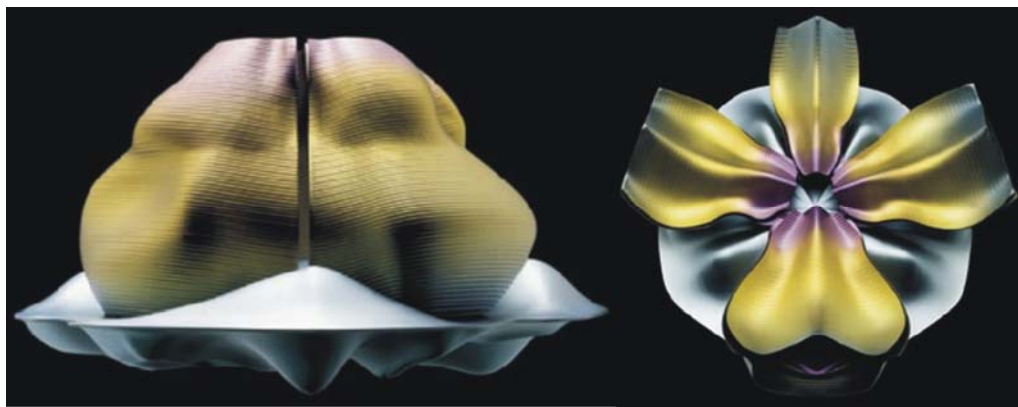


Figura 2.95: Projeto Alessi Tea & Coffee Piazza 2000 de Greg Lynn
Fonte: <http://www.glform.com>

O papel dos diferentes profissionais envolvidos na indústria da construção civil também está sendo modificado em consequência do surgimento dessas novas tecnologias. Estão surgindo novos nichos de atuação desses profissionais vinculados ao emprego das novas tecnologias. A produção e inovação do processo de projeto com a utilização dos equipamentos de prototipagem e fabricação digitais vêm renovando a maneira como o arquiteto projeta e chega ao produto final. A utilização do CAD como uma ferramenta inteligente de projeto é o direcionamento que o grupo *Smart Geometry* (SG) enfoca unindo prática, pesquisa e academia. Criado em 2001, o interesse do grupo varia entre o estudo do projeto paramétrico e a manufatura digital por meio de *workshops* e conferências. As atividades utilizam preferencialmente o *software* paramétrico *Generative Components* (Bentley) e mostram que as ferramentas paramétricas aliadas à tecnologia de manufatura rápida estão colaborando para o

²⁹

<http://www.glform.com/>

surgimento de novas formas arquitetônicas e diferentes estruturas que estão modificando radicalmente o ambiente construído. Além disso, segundo Coenders (2008), professor da Universidade de Delft e um dos colaboradores do grupo, “... demonstra uma evolução dos sistemas tradicionais de CAD com grandes benefícios, visto que os sistemas paramétricos modelam um processo generativo onde é possível representar a lógica do projeto e o conhecimento do arquiteto de maneira explícita”. A figura 2.96 ilustra alguns trabalhos derivados do *workshop* intitulado “*Parametric Modeling and Digital Wood Fabrication*”, patrocinado pelo *Canadian Design Research Network* e ministrado pelo SG em 2007.

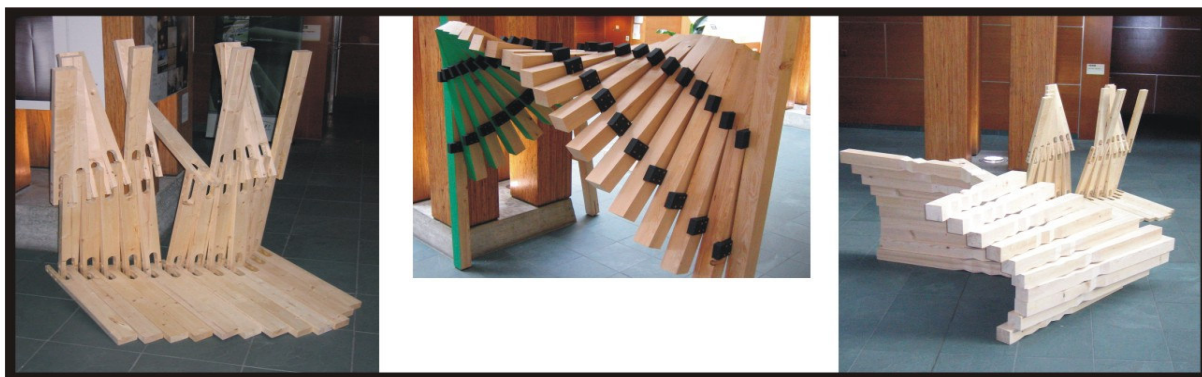


Figura 2.96: Protótipos produzidos em CNC no workshop
“*Parametric Modeling and Digital Wood Fabrication*” do Smart Geometry Group
Fonte: <http://www.smartgeometry.org>

A complexidade das formas e superfícies que as técnicas de fabricação digital fazem emergir da mente do arquiteto hoje, pode não ter sentido se, por algum motivo, não puderem ser construídas. Isso é passível de acontecer caso um planejamento de aproveitamento de material e de montagem não forem pré-estabelecidos. Nesse caso, o aproveitamento de material, (*nesting*) pôde ser feito por meio de *software* Rhino Nesting, um *plug-in* do Rhinoceros, específico para este fim acomodando as partes do objeto a serem cortadas, otimizando a ocupação da chapa de corte, ocorrida em CNC. A segunda importante parte do planejamento pré-estabelecido é a própria montagem das peças. A utilização da fabricação digital aumenta a precisão das montagens e, frequentemente, não há a necessidade de ajustes. Com cortes em aço ou madeira, a

geometria e os furos de encaixes são precisamente localizados diretamente pelos dados enviados pelo sistema CAD. Talvez, com o uso mais freqüente das geometrias de formas livres, seja uma oportunidade de retornar às técnicas tradicionais de montagem utilizando interligações e conexões da carpintaria, por exemplo. A figura 2.97 mostra uma cadeira montada com 150 peças planas de madeira, sem a utilização de pinos ou adesivos para sua sustentação. Todas as peças são encaixadas e encurvadas, manualmente, durante a montagem criando resistência estrutural e física ao objeto composto. Mesmo a montagem não sendo automatizada, a precisão com que as peças são produzidas torna o processo manual de fácil compreensão, cortando custos e tempo.



Figura 2.97: Cadeira produzida com técnicas de fabricação digital e montada manualmente
Fonte: Pottmann et al (2007, p. 597)

A utilização de equipamento de controle numérico para a fabricação digital traduz a relação direta entre o arquiteto e o produto manufaturado. Geralmente, os fabricantes das máquinas se adaptam às necessidades do cliente customizando os equipamentos de acordo com o que o arquiteto e sua equipe necessitam. A empresa MultiCAM³⁰, sediada em Dallas, nos Estados Unidos, é um dos maiores fabricantes de

³⁰ MultiCAM: <http://www.multicam.com/eng/>

equipamentos CNC (além de produzir e comercializar outros equipamentos para CAM) e acaba de configurar uma máquina com uma área de trabalho de 13 metros de comprimento (Figura 2.98). O equipamento também possui duas pontes rolantes e pode ser trabalhada em qualquer das extremidades do sistema ou uma ponte pode ser utilizada para trabalhar em uma peça com até 10 metros de comprimento.



Figura 2.98: CNC Router MultiCam MG200
Fonte: <http://www.multicam.com/eng/Products/custom.html>

No Brasil já existem diversas empresas que também produzem equipamentos CNC customizados de acordo com a preferência e necessidade do cliente. As técnicas de CAD/CAM, especialmente as que utilizam equipamento CNC, têm sido utilizadas desde a década de 80, mas somente muito recentemente os arquitetos tiveram contato com esta tecnologia e, mais importante, têm ajustado seus paradigmas de projeto e métodos adequadamente (Bechthold, 2007).

2.4. A importância da maquete no processo de projeto

A utilização de maquetes como auxílio no processo de projeto não nasceu nos dias de hoje com o advento da tecnologia. No Renascimento, mais precisamente entre os anos de 1558 e 1561, durante o projeto da igreja de São Pedro, em Roma, Michelangelo (1475-1564) construiu um modelo feito em madeira com cinco metros de

altura para o projeto do domus da igreja, como uma forma de estudar e melhor entender o projeto além de testar a construção de sua geometria (figura 2.99). Um modelo dessas proporções, naquela época, foi montado em diversas partes, todo esculpido e montado à mão, e, segundo Pottmann et al (2008), é um dos primeiros e formidáveis exemplos de maquete arquitetônica a qual demonstra o papel do modelo tanto como representação de uma idéia como um teste de construção de um prédio em escala real.

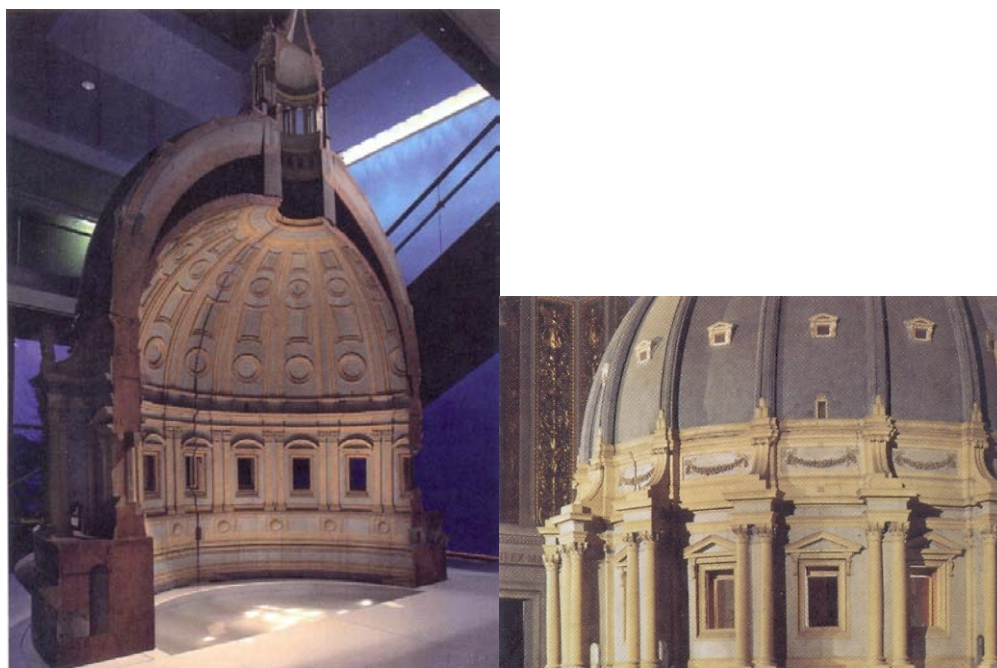


Figura 2.99: Modelo do domus da Igreja de São Pedro construído por Michelangelo em 1558
Fonte: Pottmann et al (2008)

Três séculos mais tarde, para a Igreja Colônia Guell, cujo projeto durou entre 1889 e 1908, em Barcelona, o arquiteto catalão Antonio Gaudi (1852-1926) desenvolveu uma maquete suspensa, em posição invertida (Figura 2.100) para que uma estrutura leve de alvenaria fosse desenvolvida. A maquete suspensa é baseada na teoria da reversão da catenária onde um sistema de fios com pesos nas pontas representava colunas, arcos, paredes e abóbodas que determinavam a forma perfeita da catenária que, visualizada por espelhos, determinavam a solução de problemas estruturais, utilizando a gravidade como maior aliada.



Figura 2.100: Maquete suspensa da Colônia Guell Church (1889-1908) de Antonio Gaudi
Foto: Regiane Pupo

A maquete ou o modelo físico tridimensional auxilia a mente para a imaginação, abastecendo o arquiteto de novas idéias, novas ferramentas e um maior controle durante o processo de projeto. Certamente, ao invés de fugir da realidade, a utilização da maquete física trabalha a agilidade técnica e a sensibilidade material em uma conexão prazerosa entre arte, ciência, arquitetura, tecnologia e prática projetual. Como meio representacional de projeto, o processo de produção de maquetes pode levar a novas formas além do conceito original. Hoje, a produção de maquetes por computador oferece oportunidades de não inibição à criação de formas complexas, além de servir de intermediário entre o projeto e a construção (SASS & OXMAN, 2006, p. 325). As técnicas de prototipagem e fabricação digitais vêm agregar novas formas de conceituação e produção da arquitetura por meio de maquetes e protótipos, em diversas aplicações.

A possibilidade de tocar o objeto e sentir suas formas por diversos materiais, melhora a criatividade do trabalho. Além disso, a maquete é uma forma tridimensional que é manipulada e estudada no mundo real, permitindo pesquisas na forma e nas proporções sem a intermediação das imagens na tela do computador. O manuseio de

um modelo físico facilita a exploração de geometrias de forma livre, mas sem limitações prematuras de idéias. A maquete também assegura que algumas questões ainda não respondidas permitam uma margem de flexibilidade levando a decisões que ainda devem ser tomadas. Se de um lado, o sentido do toque é muito importante para a percepção humana, permitindo a total compreensão da geometria tridimensional, por outro, o sentido da visão obviamente é grande colaborador da percepção humana. Mesmo com uma grande variedade de métodos de interação gráfica, poucas técnicas baseadas em programas de computador permitem ao arquiteto criar diretamente com suas mãos. Entretanto, o uso do sentido tátil nos dá resultados mais interessantes. Como exemplo, pode-se ver a importância das mãos na coordenação visual na digitalização de esculturas; a continuidade visual de uma caneta ótica é superada pela expressão de um modelo tridimensional com uma continuidade visual e tátil, sem comandos, mas pelo toque.

Para alguns arquitetos, como Frank Gehry, a palpabilidade de um modelo físico é muito importante, além de ser a maneira preferida de projetar ao invés da manipulação digital de superfícies planas na tela do computador (Kolaveric, 2003, p. 31). No processo de projeto de Frank Gehry, as tecnologias digitais não são utilizadas como meio de concepção projetual, mas sim como um meio de interpretação de um processo que utiliza os modelos físicos como *input* e, por intermédio da engenharia reversa (digitalização), produz a informação digital como *output*.

No projeto Der Neue Zollhof, as formas e o agrupamento arquitetônico urbano do complexo como um todo é resultado de inúmeras variações de maquetes (Figura 2.101). Cada variação foi digitalizada e refinada no programa de CAD, o CATIA, para posteriormente ser testada em um modelo físico prototipado.

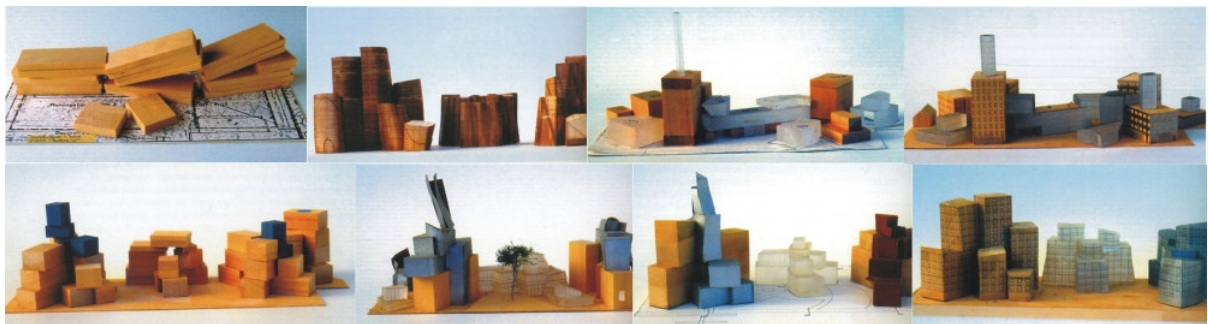


Figura 2.101: Variação de maquetes na concepção do projeto
Fonte: Schmal (2001)

Na seqüência de imagens da figura 2.102 (Pollack, 2006), pode-se acompanhar a fase inicial do processo de projeto de Frank Gehry, em que a manipulação de um simples e rudimentar modelo 3D, em papel cartão, cortado com tesoura e as partes coladas com fita adesiva, fazem parte de um momento único de inspiração e criação.



Figura 2.102: Processo de projeto de Frank Gehry
Fonte: Pollack (2006)

Segundo Dorta (2005), no novo papel da tecnologia no projeto, ele deve ser integrado às tradicionais ferramentas básicas. Não é uma questão de substituição por ferramentas equivalentes, mas sim a utilização de suas vantagens para o

processamento de dados transformando-se em ferramentas mais eficazes, pois o trabalho manual é importante no início da criação projetual.

Para Bernhard Franken (Kolarevic, 2003, p. 127) a maquete física é indispensável nos projetos executados por sua equipe, desde o desenvolvimento até sua apresentação. A complexidade das formas de seus projetos torna difícil o entendimento por desenhos e imagens, fazendo da maquete um meio de comunicação importante na interpretação de perspectivas, efeitos de iluminação e muitas vezes elucidando detalhes escondidos nas imagens no computador. Em seus projetos, geralmente são utilizados equipamentos de prototipagem rápida ou maquinário CNC, como foi o caso do projeto “Wave” em que um modelo aramado foi construído (Figura 2.103).

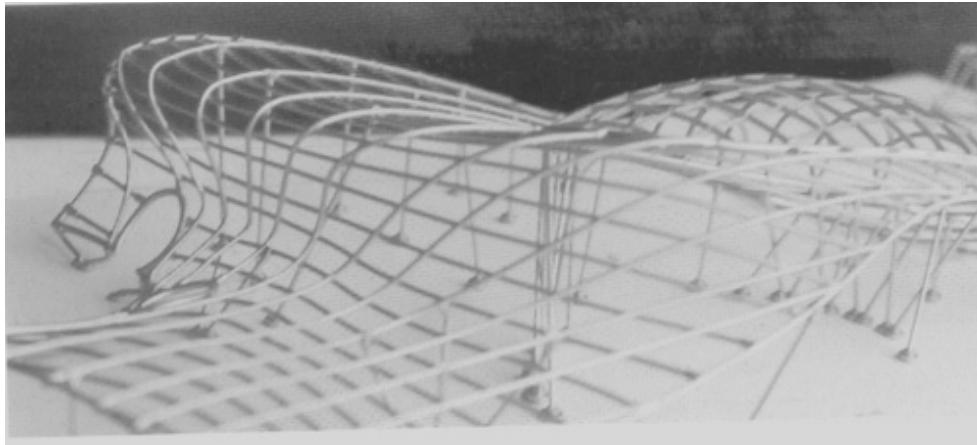


Figura 2.103: Maquete aramada para estudo, Bernhard Franken
Fonte: Kolarevic (2003, p. 127)

Em muitos casos, durante os vários estágios do processo de projeto, é comum a troca de mídias de representação, entre modelos virtuais e físicos. Segundo Pottman et al (2007, p. 601), geralmente, os processos de projeto baseados em maquetes físicas adquirem uma vantagem sobre os virtuais, especialmente nas fases iniciais devido à sua natureza aberta e colaborativa. Além disso, os materiais físicos dão uma resposta muito mais completa ao arquiteto no que se refere à coordenação entre o “ver” e o “fazer”. A maquete é uma ferramenta eficaz que experimenta formas que irão ser

construídas em tamanho real. Por ser parte integrante da maioria dos projetos de arquitetura, tem, ainda, papel fundamental tanto no desenvolvimento do projeto quanto na sua representação final em diferentes escalas (Pottmann et al, 2008).

A maquete pode ser construída em qualquer escala, mesmo em escala real, o que possibilita a intervenção direta no *mock-up*³¹, mesmo que sem preocupação com materiais, mas com a função de avaliações de volume, possibilitando que as decisões das formas e detalhes possam ser efetuadas diretamente no objeto. Geralmente, os protótipos, também em escala real, têm uma preocupação mais perto da realidade quanto a materiais, com testes na aplicação de revestimento e cores, para fins de avaliação estética e funcionalidade durante a fase de projeto. O projeto Strata Center, de Frank Gehry, é um ótimo exemplo (Figura 2.104).



Figura 2.104: Utilização de protótipos em escala 1:1, Strata Center
Fonte: Digital Design Fabrication Group, 2006 (www.ddf.mit)

Os modelos de representação, geralmente em escalas reduzidas, diminuem a quantidade de detalhes que podem ser identificados. Por outro lado, permite a utilização de diversos materiais, com propriedades relacionadas tanto ao que representam conceitualmente, ou mesmo com a representação do material final, caso

³¹ Mock up- técnica de representação tridimensional que se fundamenta na simulação de materiais e soluções estéticas e sistemas funcionais, possibilitando a verificação e o acompanhamento de soluções preliminares de um projeto (Starud, 2004).

da maquete da figura 2.105, de um projeto de Frank Gehry. O material utilizado tentou representar ao máximo o que realmente ira ser construído, embora em escala reduzida.



Figura 2.105: Maquete de projeto de Frank Gehry
Fonte: Potmann (2007, p. 601)

Materiais como o papelão, por exemplo, são freqüentemente utilizados para a representação de superfícies em maquetes de escala reduzida, devido à sua facilidade de uso e flexibilidade (Figura 2.106). As impressoras 3D oferecem alta precisão e ao mesmo tempo garantem a representação de detalhes complexos. Contudo, muitas vezes, para que uma peça seja impressa em escala muito pequena, a geometria e espessura devem ser alteradas para os limites mínimos e máximos da máquina (Figura 2.107).

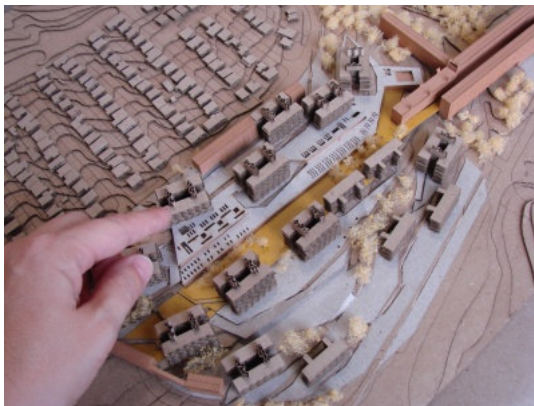


Figura 2.106: Maquete em papelão
Foto: Regiane Pupo

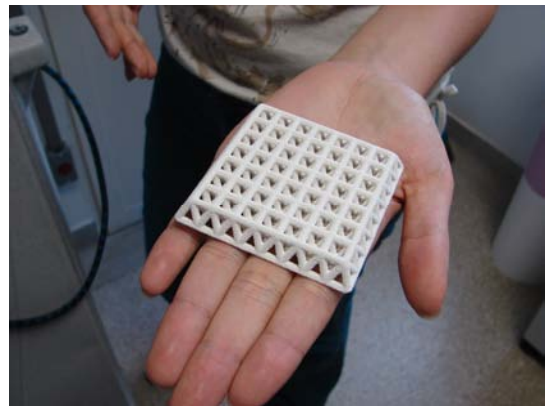


Figura 2.107: Exemplo de maquete impressa em 3D
Foto: Regiane Pupo

Portanto, pode-se afirmar que quanto maior a maquete, mais rica em detalhes ela será, independente da técnica de execução. As três ilustrações da figura 2.108 mostram os diferentes níveis de detalhes, em diferentes escalas, na confecção da maquete da Phare Tower, em Paris, do escritório americano Morphosis³², o qual tem extensa experiência na utilização de maquetes prototipadas, em todas as fases do processo de projeto. A equipe do Morphosis tem a tradição de trabalhar com a adaptação de modelos em diferentes escalas, separadamente, para o desenvolvimento de projeto e para a impressão. Os três exemplos mostram (a) uma imagem virtual na tela do computador, rica em detalhes, (b) um modelo 3D físico usado no desenvolvimento do projeto, na escala 1:500 e (c) um modelo 3D físico de representação e rico em detalhes na escala 1:200.

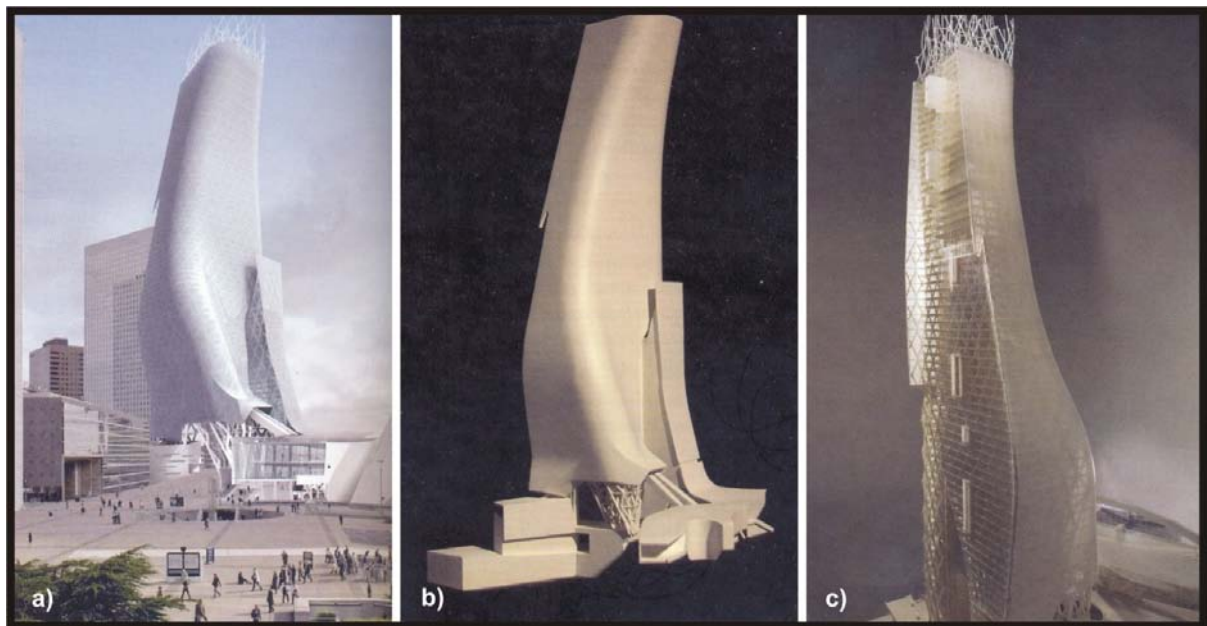


Figura 2.108: Três exemplos de detalhes em maquetes
Fonte: Pottmann et al (2008, pp. 574)

Para Eliasson (Abruzzo et al, 2007, p. 19) “... o que estamos presenciando é uma mudança no relacionamento tradicional entre realidade e representação; a maquete se tornou uma co-produtora da realidade”.

³²

Morphosis: <http://www.morphosis.net/>

3. Materiais e métodos

*“What I read, I forget,
what I see, I remember,
What I do, I learn”
(old chinese proverb)*

Esta pesquisa se desenvolveu em três fases: (1) levantamento de teses, (2) exemplos de aplicações e estudos de caso e (3) experimentos pedagógicos. Em cada uma delas diferentes materiais e métodos foram utilizados, como demonstrado na figura 3.1. Primeiramente, para que se pudesse estabelecer o universo a ser estudado, foi conduzido um levantamento de dissertações e teses que continham temas relacionados à aplicação da informática no ensino de projeto. Essa etapa teve o objetivo de identificar uma lacuna nessa área de estudo, delimitando o nicho desta pesquisa, que foi direcionada para as aplicações da prototipagem e fabricação digitais no ensino de projeto. Nesta etapa foi utilizado o método da Teoria fundamentada nos dados (STRAUSS; CORBIN, 1998) e os materiais utilizados foram as bases de dados das universidades, disponíveis na internet.

A segunda etapa consistiu em estudar diversos exemplos e analisar com maior profundidade alguns casos nos quais a prototipagem e a fabricação digitais estão sendo aplicadas tanto no ensino de projeto quanto na prática profissional de arquitetura, servindo como preparação para a fase seguinte. Os exemplos foram coletados a partir de busca em bases de dados e literatura. Os estudos de caso foram desenvolvidos por meio do método de imersão (GIL, 2002) durante as implantações de dois laboratórios, em duas renomadas instituições de ensino de arquitetura, uma no Brasil (FEC - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp – Universidade Estadual de Campinas) e outra no exterior (Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal). Os materiais utilizados nessa fase de imersão foram os equipamentos disponíveis nos dois laboratórios freqüentados para as pesquisas, LAPAC (Laboratório

de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção) e ISTAR (IST Architectural Research Lab), respectivamente.

Por fim, após as constatações resultantes, foram desenvolvidos alguns experimentos pedagógicos no LAPAC, da FEC, na UNICAMP. Esses experimentos tiveram como objetivo avaliar o impacto da introdução de conceitos sobre as tecnologias de prototipagem e fabricação digitais no processo de projeto. Essa etapa se deu por meio de duas ferramentas: (1) *workshops* ministrados a alunos e professores de graduação e de pós-graduação da FEC e de outras instituições e (2) o acompanhamento dos trabalhos finais de graduação, ambas com a utilização das tecnologias de prototipagem digital disponíveis no LAPAC. A avaliação dos resultados dessa etapa se deu por meio do acompanhamento com registro fotográfico dos trabalhos resultantes e aplicação de questionários de avaliação. A completa descrição dos materiais e equipamentos utilizados nessa fase está no item 5.3 desta tese.

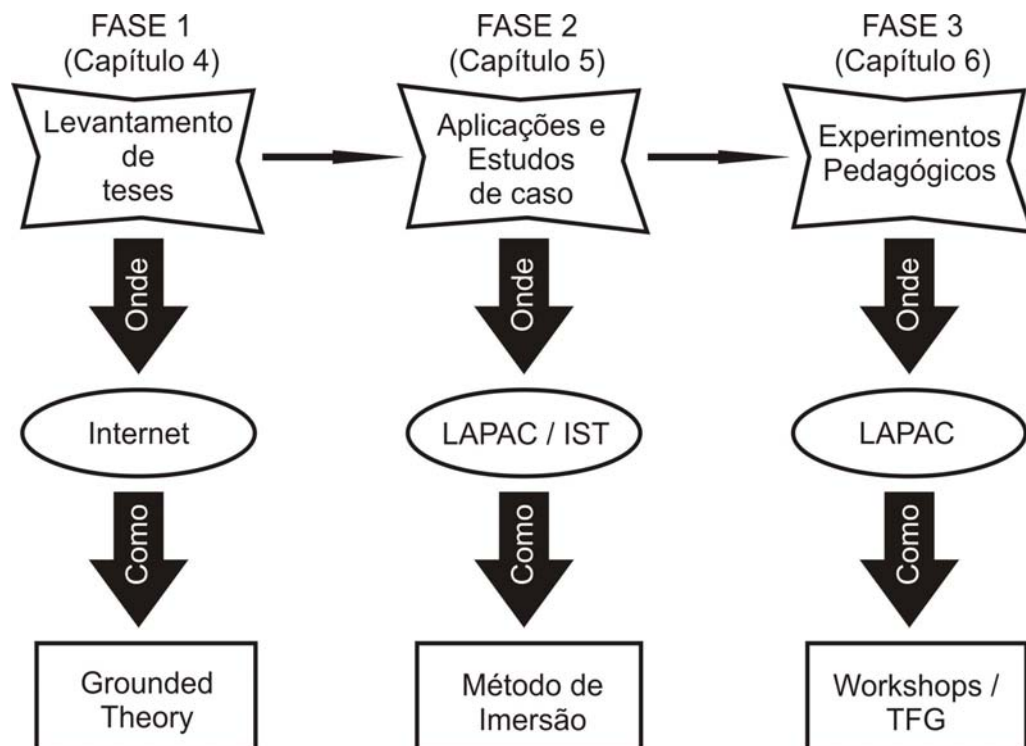


Figura 3.1: Estrutura dos próximos capítulos

4. Levantamento de teses

*"There must be a lot of room for
a completely renovated
architectural education".*
(Mark Burry)

A pesquisa foi executada entre julho e outubro de 2006, exclusivamente com informações e dados obtidos por meio da Internet, com trabalhos publicados em inglês e português. As bases de dados consultadas para a pesquisa foram: Proquest; DSpace (MIT); Cumincad; Dedalus (USP); SCIX; CiteSeer; Diva-portal; BDTD; E-THESES, além das disponíveis nos *sítes* de universidades brasileiras e estrangeiras. Devido à grande diversidade de temas e assuntos abordados nas dissertações e teses publicadas, o critério utilizado para a seleção dos trabalhos foi a busca de palavras-chaves, tais como, *CAD, Computational Design, Design Process, Architectural Design, Rapid Prototyping, Digital Fabrication e Generative Systems*. No total, foram registrados 74 trabalhos, divididos entre 36 dissertações de mestrado e 38 teses de doutorado, publicados entre 1999 e 2006. Desse total, 26 trabalhos eram de universidades brasileiras e 48 de estrangeiras. Essa diferença quantitativa entre trabalhos brasileiros e estrangeiros se deve ao fato de que a maioria das universidades brasileiras ainda não dispõe de bancos de dados de teses *on-line*. Mesmo assim, foi possível traçar um panorama sobre o que vem sendo estudado no Brasil e no exterior quanto à aplicação da informática no ensino de projeto. A comparação entre as teses brasileiras e estrangeiras visava a identificação das principais diferenças a respeito da utilização da tecnologia da informação aplicada à arquitetura. É importante ressaltar que o objetivo da pesquisa não era *estatístico*, mas qualitativo. Por estas razões, a teoria fundamentada nos dados (*Grounded Theory*) foi utilizada na análise dos dados coletados.

A teoria fundamentada nos dados é uma metodologia interpretativa de pesquisa que busca compreender a realidade a partir dos significados atribuídos pelos indivíduos às suas experiências (GOULDING, 2002 apud GODOI, 2006, p. 26). Pode ser tratada como um método de pesquisa ou definida como uma metodologia em si própria (STRAUUS; CORBIN, 1998). A *Grounded Theory* foi desenvolvida na década de 60 por dois sociólogos, Barney Glaser e Anselm Strauss, e tinha como objetivo gerar explicações, com a mínima intervenção do pesquisador, sobre a ação dos indivíduos em um contexto delimitado, a partir da realidade dos mesmos: por que e como determinado grupo age, ou interage com outros grupos, em situações contextuais específicas e delimitadas (GODOI, 2006). Por se tratar de um método de pesquisa que procura desenvolver uma teoria fundamentada nos dados coletados em campo, a partir da sua compilação e análise, Fell (2004 apud TRAUTH, 1998) afirma que “a *grounded theory* é uma metodologia para descobrir teorias, permitindo ao pesquisador desenvolver julgamentos teóricos das características gerais de um tópico, tomando como base considerações empíricas ou dados”. Desta forma, o pesquisador pode aproximar-se do assunto a ser investigado sem uma teoria a ser testada, mas com o desejo de entender uma determinada situação ou um determinado fenômeno, por meio de métodos variados de coleta de dados. Posteriormente, de posse de todas as informações, reúne-se o volume coletado sobre o fenômeno observado, comparando, codificando e extraindo as regularidades. Com isso, somente nas conclusões das pesquisas, é que o pesquisador descreve teorias resultantes da análise rigorosa e sistemática do método.

No caso da presente pesquisa, a *grounded theory* se fez grande aliada para a fase preliminar por permitir a utilização de diversas fontes de pesquisa além de ajudar o observador (pesquisador) a interpretar os dados, interagir com a realidade dos sujeitos e fornecer uma explicação sobre o comportamento coletivo do tema abordado. Como se trata de uma teoria que emerge dos dados, os quais revelam as preocupações dos indivíduos, possui o objetivo restrito de ter como resultado uma teoria substantiva, específica para um grupo determinado sem generalizar além de sua área

(FERNANDES, 2001). Uma das características das análises qualitativas é que “pode ser utilizada para descobrir e entender o que existe por trás de um fenômeno ainda pouco conhecido” (STRAUS & CORBIN, 1998). Assim, esta pesquisa se baseou em um grupo delimitado de trabalhos de pós-graduação que possuem semelhanças e diferenças, as quais serviram para o estabelecimento dos critérios de análise, pois seria difícil ter acesso a todas as teses publicadas sobre o assunto no mundo, recentemente.

A pesquisa iniciou com a hipótese de que haviam diferenças entre os tópicos sendo estudados no Brasil e em outros países na área de aplicação da tecnologia da informação para a arquitetura. Entretanto, não era claro, ainda, quais diferenças eram estas. A análise dos dados foi efetuada em 3 passos: (1) os tópicos mais importantes que cada tese abordava foram listados; (2) cada tese foi associada ao tópico correspondente da lista; (3) as teses foram agrupadas em categorias baseadas nos tópicos por elas discutidas. A análise dessas categorias permitiu que os trabalhos fossem organizados primeiramente em dois grupos, brasileiros e estrangeiros. Depois de uma análise preliminar de conteúdo de todos os trabalhos de cada grupo, alguns tópicos foram criados e definidos com os temas mais abordados por cada grupo:

- Grupo 1 - Trabalhos brasileiros: implantação da tecnologia CAD no Brasil; análise e avaliação de programas CAD aplicado à arquitetura; apoio CAD às etapas de criação e projeto; produção as etapas legais de projeto com auxílio do CAD; integração do CAD com o usuário; composição arquitetônica; modelagem 3D; topologia; fases iniciais de projeto; história ensino de projeto; conforto ambiental; CAD no ensino de projeto; CAD como instrumento de ensino de desenho; layout de laboratórios de CAD; CAD colaborativo; ambiente virtual de ensino e aprendizagem em arquitetura; TRIZ - Teoria da Resolução de Problemas Inventivos; processo de projeto; gestão de empresas de projeto; programação; algoritmos; implementação.

- Grupo 2 - Trabalhos estrangeiros: interação a computação com o projeto de arquitetura; interação com o processo de projeto; características qualitativas e quantitativas do CAD; ferramentas tradicionais versus ferramentas de CAD; procedimentos de projeto atuais versus tradicionais; geometria; topologia; identificação dos pontos positivos do processo de projeto com CAD; melhora dos pontos negativos do processo de projeto com CAD; Shape Grammar (gramática da forma); modelos matemáticos; algoritmos; métodos paramétricos; programação; avaliação do processo de projeto; ferramentas digitais de ensino; uso do CAD na WEB; projeto colaborativo; suporte na tomada de decisões; fases iniciais de projeto; exploração da forma (2D e 3D); visualização; CAM – *Computer Aided Manufacturing*; Realidade Virtual; implementação.

Com estes dados, duas tabelas foram produzidas mostrando os tópicos que continham cada grupo (Apêndices I e II). Após uma análise minuciosa nestas tabelas, foi possível agrupar as teses que tinham tópicos em comum, criando e organizando novas categorias para cada grupo, como demonstrado nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – Categorias dos trabalhos Brasileiros

Categoria	Nº de teses
Avaliação de pacotes CAD	2
CAD no processo de projeto (como ferramenta administrativa para visualização e colaboração remota)	6
CAD para otimização, análise e simulação	2
CAD na educação (Processo de projeto e expressão gráfica)	8
CAD no desenvolvimento da topologia e formas complexas	2
CAD e conceitos computacionais nas fases iniciais de projeto	3
Conceitos computacionais (desenho orientado ao objeto e gramáticas da forma)	3

Tabela 4.2 – Categorias dos trabalhos estrangeiros

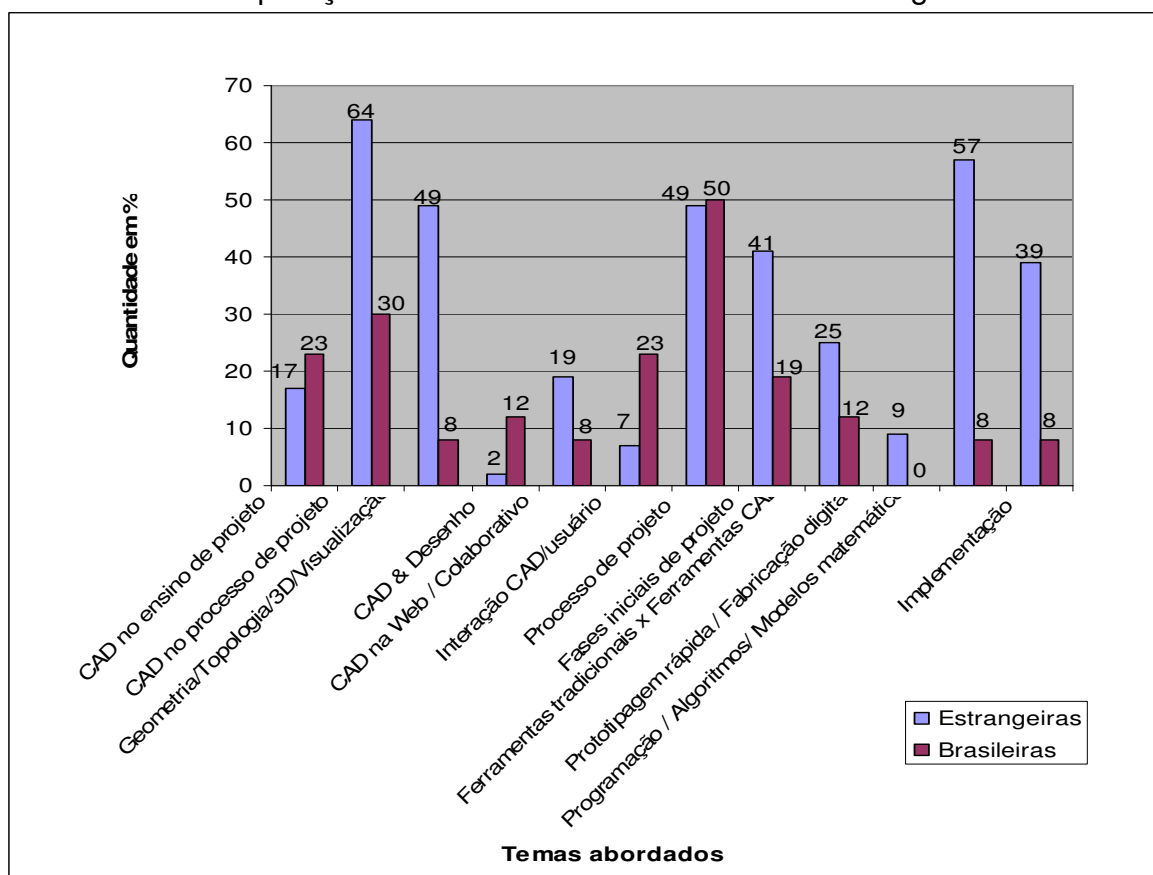
Categoria	Nº de teses
Desenho paramétrico	4
Aplicações CAD no processo de projeto	9
Ensino de projeto	3
Programação no ensino de projeto	3
Computação em projeto	5
Conceitos computacionais	5
Programação em projeto arquitetônico	1
Análise de CAD	2
Fabricação digital/ Prototipagem rápida	3
Ensino a distancia/colaboração remota	3
Computational design – crítica e teoria	2
Sistemas baseados no conhecimento e tomada de decisões	4
Visualização e representação	4

Com base nas categorias acima descritas, foi possível entender as diferenças entre os tópicos sendo estudados no Brasil e no exterior. Dentre os temas abordados nos trabalhos brasileiros, é visível a predominância da preocupação com o ensino e o papel do CAD no processo de projeto. Isso revela que, aparentemente, a preocupação da pesquisa no âmbito das universidades brasileiras está preocupada, ainda, em provar que o CAD precisa estar presente nos currículos dos cursos de arquitetura, bem como nas práticas de projeto. Além disso, nenhuma delas abordou temas como prototipagem rápida ou CAM - *Computer Aided Manufacturing* - computador auxiliando a manufatura. Tópicos como “sistemas especialistas” (*expert systems*) ou “sistemas de suporte às decisões” (*Decision-support systems*) igualmente não foram citados nas pesquisas dos trabalhos brasileiros, o que mostra uma influência não muito importante quanto ao estudo da Inteligência Artificial nas pesquisas sobre arquitetura brasileira, atualmente.

Dentre as teses estrangeiras, nota-se claramente que a preocupação está muito além da discussão se realmente é necessária a introdução de ferramentas CAD no processo de projeto. Temas abordados como desenho paramétrico, *shape grammars*, sistemas generativos e prototipagem rápida, entre outros, demonstram um pensamento dominante sobre a maneira como estas ferramentas podem ser introduzidas no processo de projeto. Com isso, pode-se deduzir que os arquitetos

brasileiros não estão interessados no desenvolvimento de suas próprias ferramentas, o que os faz mais dependentes de pacotes CAD. O gráfico 3 identifica a comparação dos temas abordados dentre os trabalhos estrangeiros e brasileiros. Pesquisadores estrangeiros, entretanto, parecem mostrar mais interesse na definição de suas próprias ferramentas de projeto. Mais do que isso, pretendem utilizar as novas ferramentas, programação, prototipagem rápida e fabricação digital como estratégias para se tornarem menos dependentes das limitações estabelecidas por pacotes CAD comerciais.

Gráfico 4.1 – Comparação de temas abordados em teses estrangeiras e brasileiras



Abordagens como CAD no ensino de projeto e processo de projeto são similarmente estudados, pelos dois grupos. Os estudos comparativos das outras categorias agrupadas demonstram que os trabalhos brasileiros ainda caminham na

trilha do CAD auxiliando especificamente o desenho ou ainda a preocupação de como estes sistemas interagem com o provável usuário. O fato é que, no Brasil, ainda não se tomou consciência de que o CAD e seus similares surgiram como ferramentas de apoio e se tornaram fundamentais para todo o processo de projeto arquitetônico. Por isso, já se faz indiscutível a sua inserção ou mesmo sua importância dentro do processo. O rumo que se deve tomar é o de adaptá-lo, da melhor forma possível, às condições e necessidades do arquiteto, inerentes ao seu trabalho. Como já esperado, o item no qual se nota claramente uma divergência de valores quantitativos quanto à sua utilização é o que se refere à programação, algoritmos e prototipagem rápida. No Brasil, ainda em fase de especulação, a utilização da programação de computadores, por arquitetos, visando a automação do processo de projeto, ainda depende de ferramentas computacionais ativas, otimização, prototipagem virtual e uma conscientização, seguida de intensa revisão e atualização curricular nas escolas de arquitetura.

Especificamente sobre a abordagem da prototipagem e fabricação digitais, encontrados em 9% dos trabalhos de universidades estrangeiras, a maioria é relacionada à integração de técnicas de representação e processos de fabricação utilizando métodos que suportem um processo rápido e que combine a modelagem digital com máquinas de controle numérico. Outras focalizaram o desenvolvimento de programas de computador voltados à prototipagem rápida utilizados como ferramenta criativa para o processo de projeto. Os números mostram que, ainda, essas aplicações são pouco exploradas dentro do meio acadêmico. Na verdade, a pesquisa demonstrou que o tema é genericamente referido como CAM, onde a prototipagem rápida e a fabricação digital se incluem. Ainda existe uma falta de clareza geral em o que considerar prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura. Os cursos de arquitetura, especialmente no Brasil, devem estar atentos às novas tecnologias, seguindo as tendências de uso no campo profissional.

5. Exemplos de aplicações e estudos de caso

*"Digital Fabrication is a relationship
between modeled geometries
and material properties".
(Larry Sass)*

Nesta etapa foram inicialmente identificados (por meio de consultas à literatura, à internet e visitas) exemplos de aplicações da prototipagem e fabricação digitais na prática profissional e no ensino de projeto. Esses exemplos foram importantes para a obtenção de informações sobre onde e de que forma essas tecnologias estão sendo aplicadas. Em seguida, foram analisados com maior profundidade dois casos em que a aplicação destas tecnologias no ensino e pesquisa em arquitetura está presente, com o acompanhamento de implantação de dois laboratórios de prototipagem rápida. Os estudos de caso, desenvolvidos por meio do método de imersão, permitiram uma aproximação maior com a problemática envolvida na implementação dessa tecnologia no ambiente acadêmico, caracterizando esta etapa do trabalho como uma pesquisa de campo.

5.1. Exemplos de aplicação na prática profissional

5.1.1. Túnel de vento

A empresa Rowan Williams Davies & Irwin (RWDI)³³, com sede em Toronto, Canadá, dá consultoria em engenharia de vento, qualidade do ar e gerenciamento acústico para diversos projetos arquitetônicos de grande porte em todo o mundo. Entre

³³ RDWI - <http://www.rwdi.com/>

seus clientes estão (1) o Taipei 101, na Tailândia, hoje o edifício mais alto do mundo; (2) o Burj Dubai, na Ásia, que ao ser terminado tomará o posto do anterior e (3) o Freedom Tower, de Daniel Libeskind, a ser construído no terreno do *World Trade Center*, em New York. Inicialmente, para esses três audaciosos projetos, a RWDI utilizou maquetes eletrônicas no *software* SolidWorks³⁴ para obter informações sobre uma série de detalhes de pressão de vento. Diversos efeitos ambientais são analisados por meio de simulações computacionais fazendo uso de *software* de dinâmica computacional de fluidos (*computational fluid dynamics* - *CFD*) liderados por programas como o Fluid³⁵ e o Virtual Wind³⁶. No caso de testes em túnel de vento necessitam de maquetes físicas do edifício a ser construído e dos prédios das imediações. Para isso, a empresa constrói maquetes de estudo utilizando a prototipagem rápida com tecnologia SLA. A figura 5.1 mostra um modelo construído em SLA com todo o entorno para ser utilizado no túnel de vento.

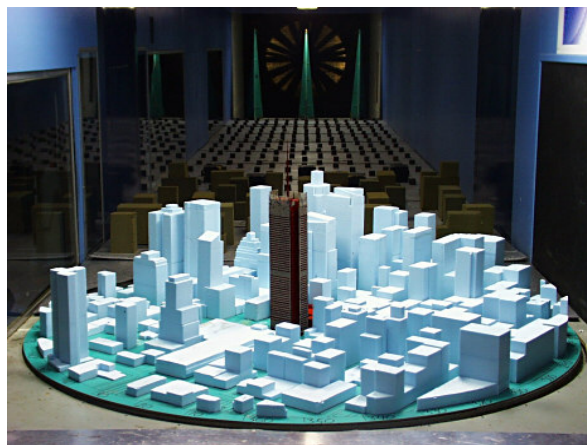


Figura 5.1: Prototipagem para testes em túnel de vento - RWDI
Fonte: <http://aec.cadalyst.com/aec/content/printContentPopup.jsp?id=480165>

Visando a obtenção de resultados mais precisos com a utilização da maquete física no túnel, foi desenvolvido um aplicativo que automaticamente instala os pontos de pressão (*pressure taps*) na maquete eletrônica para que o modelo físico já saia da máquina de SLA com os furos perfeitamente posicionados e espaçados para os testes,

³⁴ SOLIWORKS - <http://www.solidworks.com/>

³⁵ Fluid *Software* - <http://www.fluent.com/software/fluent/index.htm>

³⁶ Virtual Wind *Software* - <http://www.virtualwind.com/>

utilizando o aplicativo e-Taps (*eletronic taps*). Segundo Mathew Browne, engenheiro especialista em vento da RDWI, no site da empresa, afirma que “quando não existiam as tecnologias de PR, algumas centenas de pontos de pressão eram instaladas manualmente nos modelos físicos. Hoje, as tecnologias de prototipagem rápida nos poupam de ter que, manualmente, furar e colar cada sensor, tarefa quase impossível em edifícios com as proporções que produzimos”. E completa, “com a automação das técnicas de modelagem e a fusão das duas tecnologias, de *software* e de prototipagem rápida, a empresa tem aumentado a eficiência em aproximadamente 15% em tempo, muito menor que o usual.

5.1.2. A Igreja Sagrada Família

A obra da Sagrada Família, em Barcelona, foi iniciada pelo arquiteto catalão Antonio Gaudi, em 1883, e ainda não foi terminada. Depois de sua morte, em 1926, inúmeras tentativas de reconstrução do templo têm sido executadas, mas a fase mais recente conta com o uso intensivo das novas tecnologias de fabricação digital e prototipagem rápida como aliadas do processo de execução, baseando-se nas maquetes e orientações deixadas por Gaudi.

Em visita realizada à obra em junho de 2007, foi possível acompanhar o uso dessas tecnologias desde o processo de projeto até a execução da obra. O arquiteto responsável pela produção das diversas peças com a fabricação digital, Maruan Halabi, ressaltou a importância do uso dessa tecnologia no projeto, sem a qual seria praticamente impossível finalizar a obra, devido à complexidade das formas, cuja geometria raramente apresenta ângulos retos. O processo de finalização da obra tem a modelagem paramétrica da peça a ser produzida como ponto de partida, utilizando-se de programas como CATIA, Rhinoceros e AutoCAD. A impressão 3D, em gesso, das diversas alternativas desenvolvidas pela equipe, em equipamento ZCorp, é geralmente

executada em escala 1:25 para testes, ou mesmo em tamanho real, em diversas partes para serem montadas posteriormente. Estas produções são apresentadas a um conselho de arquitetos responsável pela obra, que tomam decisões com base nesses modelos físicos e nos desenhos originais. Quando aprovadas, as peças são produzidas com o uso de uma fresa CNC (que se encontra instalada no canteiro de obras, na própria igreja) para a produção de moldes (no caso de moldagem *in loco* ou pré-moldagem no canteiro) ou contramoldes (no caso de pré-fabricação industrial, fora do canteiro). A montagem dos moldes e aplicação de desmoldante, bem como o seu transporte até os locais em que serão concretadas são efetuados com o auxílio de guindastes. A Figura 5.2 mostra o uso da fabricação digital na elaboração de maquetes e peças da igreja.



Figura 5.2: Uso da fabricação digital na Igreja Sagrada Família, Barcelona
Fotos: Gabriela Celani e Regiane Pupo (2007)

5.2. Exemplos de aplicação no ensino

5.2.1. No Brasil

Por um período superior a vinte anos, as escolas de arquitetura têm tentado incorporar cada vez mais as tecnologias CAD em disciplinas de projeto. No Brasil, na maioria das escolas de arquitetura, as tecnologias CAD têm sido introduzidas isoladamente, muitas vezes como cursos extracurriculares, com o objetivo de dar ao aluno uma base simples para a futura inserção no mercado de trabalho. Alguns centros de excelência em pesquisas de diversas áreas, no Brasil, estão em pleno desenvolvimento de novas soluções, com novas perspectivas e buscando inovações, inclusive nas áreas de arquitetura e construção. Inevitavelmente, fatores econômicos e sociais são os responsáveis diretos pela morosidade e falta de incentivo na utilização e aplicação de novas técnicas, como prototipagem e a fabricação digitais na arquitetura e construção. Os econômicos estão relacionados aos altos custos dos equipamentos e insumos, em sua maioria importada dos Estados Unidos e da Europa. Mesmo com algumas empresas nacionais terem recentemente começado a investir no desenvolvimento e produção de maquinário para fabricação digital, o investimento ainda é alto. Existe também uma grande limitação social ao emprego dessas técnicas na área de arquitetura e construção no Brasil pela escassez de mão de obra especializada que não condiz com a necessidade emergencial que o mercado requer hoje.

Além disso, o ensino superior de arquitetura e de engenharia civil, bem como o ensino técnico de nível médio e superior na área de construção civil, ainda não prevêem o uso desses novos sistemas de produção, seja para a confecção de maquetes ou diretamente na fabricação de partes do edifício. Em geral, no exterior e no Brasil, as primeiras pesquisas na área de prototipagem e fabricação digitais tiveram

início nas escolas de engenharia mecânica e de produção. Em levantamento realizado na base de dados do Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil do CNPq, pôde-se constatar que os pioneiros no Brasil são: (1) o grupo de pesquisas CIMJECT³⁷ (Laboratório de Projeto e Fabricação de Componentes de Plástico Injetado), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, criado em 1993, que desenvolve pesquisas ligadas à “fabricação de componentes de plástico moldados por injeção” (CNPq, 2008); (2) o grupo NUMA³⁸ (Núcleo de Manufatura Avançada), criado em 1996, do Departamento de Engenharia de Produção da Escola de Engenharia de São Carlos (USP-SC), que estuda técnicas de fabricação de moldes por meio de processos aditivos e subtrativos e (3) o SCPM³⁹ (Núcleo para Manufatura e Projeto Integrados), criado em 1995, do Departamento de Engenharia Mecânica da UNIMEP (Universidade Metodista de Piracicaba), em São Paulo, que estuda o desenvolvimento de sistemas integrados de CAD/CAM/CNC.

A mesma pesquisa verificou a existência de apenas três grupos cadastrados atuantes na área específica de prototipagem rápida e/ou fabricação digital aplicadas à arquitetura e/ou construção civil. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 5.1 e a relação completa da pesquisa da base de dados do CNPq encontra-se no Apêndice III. Além dos grupos apresentados abaixo, é preciso esclarecer que há diversos grupos de pesquisas, como o LCAD (Laboratório de computação gráfica aplicada à arquitetura e ao desenho) da UFBA, criado em 1992, que também se interessa pelo tema, mas que ainda não dispõe dos equipamentos necessários para aprofundar suas pesquisas nessa área.

³⁷ <http://www.cimject.ufsc.br/inicial.htm>
³⁸ www.numa.org.br
³⁹ www.unimep.br/feau/scpm

Tabela 5.1: Grupos de pesquisa que investigam aplicações da prototipagem e fabricação digital na arquitetura e construção no Brasil

Fonte: Base de dados CNPq (2008)

Grupo de pesquisa	Ano de formação	Instituição	Unidade	Linhas de Pesquisa	Objetivos
Laboratório de Estudos Computacionais em Projeto	2000	UNB	FAU Depto. Projeto	° Prototipagem Rápida ° Fabricação Digital	Não especificados.
Arquitetura, processo de projeto e análise digital	2005	Mackenzie	FAU Depto. Projeto	° Análise digital de obras de arquitetura moderna e contemporânea	Analisar obras de arquitetura por meio de modelos tridimensionais, simulações digitais e prototipagem rápida.
Teorias e tecnologias contemporâneas aplicadas ao projeto (Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção)	2006	UNICAMP	FEC Depto. Arquitetura e Construção	° Prototipagem rápida ° Fabricação digital ° Digitalização 3D	Estudar as aplicações da digitalização 3D, prototipagem rápida e fabricação digital no processo de projeto em arquitetura, da concepção à execução da obra.

Para um entendimento quanto ao uso das novas tecnologias de Prototipagem e Fabricação Digitais para arquitetura e construção no Brasil, há de se espelhar, primeiramente, nas pesquisas e investigações que vêm sendo feitas em alguns centros no exterior.

5.2.2. No Exterior

Um dos pioneiros no uso das tecnologias foi William Mitchell, do MIT (Massachusetts Institute of Technology), nos Estados Unidos. Já em 1995, no livro

Digital Design Media, Mitchell e McCullough descrevem diversas aplicações na arquitetura, ilustradas por casos reais em projetos de Frank O. Gehry. Enquanto as primeiras aplicações da tecnologia da PR causavam enorme impacto no desenvolvimento de produtos, a sua influência crescia muito rapidamente. Universidades em todo o mundo estão agora utilizando as novas tecnologias de forma inovadora, variada e conduzindo pesquisas importantes para a evolução e aplicabilidade mais intensa em todas as camadas da sociedade. A partir da última década, os cursos de arquitetura das principais universidades americanas e européias vêm disponibilizando para seus alunos e pesquisadores laboratórios equipados com diferentes técnicas de prototipagem rápida e fabricação digital. Dentre alguns dos laboratórios de ponta hoje, direcionados às pesquisas em arquitetura no exterior, estão o Digital Design Fabrication Group do Massachusetts Institute of Technology⁴⁰ (EUA), o I-made da Ball State University⁴¹ (EUA), o Architecture and Digital Fabrication da Swiss Federal Institute of Technology in Zurich⁴² (Suíça), o CAMLab da Delft University of Technology⁴³ (Holanda) e o ISTAR do Instituto Superior Técnico de Lisboa (Portugal). Uma listagem atualizada de alguns laboratórios é fornecida no apêndice IV.

A Faculdade de Arquitetura da Universidade de Delft, na Holanda, tem se concentrado no desenvolvimento de novas aplicações desde 2002, com a implantação do laboratório de CAM (CAM-lab). Iniciando suas atividades com uma pequena fresadora, os equipamentos foram sendo adquiridos gradativamente, uma impressora 3D e uma cortadora laser. Devido ao grande interesse dos alunos, pesquisadores, professores e profissionais fora do meio acadêmico, a capacidade do laboratório mais que dobrou e ainda está em plena ascensão (BREEN, 2007). As dependências do CAM-lab são basicamente utilizadas para a exploração dos benefícios da modelagem física e prototipagem. Com isso, constantes esforços estão sendo feitos para que uma ligação com os procedimentos da produção industrial seja efetuada, objetivando um contato maior com a produção comercial em grande escala. Com o uso de diferentes

⁴⁰ www.ddf.mit.edu

⁴¹ www.bsu.edu/imade

⁴² www.dfab.arch.ethz.ch

⁴³ www.bk.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=0681ceeb-180e-42a9-8a08-1905b377c130&lang=nl

técnicas como a fresadora, a cortadora laser e a impressão 3D, os alunos são estimulados à descoberta de como o desenvolvimento de projeto e produção podem ser influenciados pelas formas, e vice-versa, assim como pelas limitações das ferramentas específicas disponíveis. Dessa forma, são capazes de obter critérios no que diz respeito à transição entre a idéia inicial e o projeto real. Com isso, o trabalho com laboratórios como a CAM-lab da Delft potencialmente familiarizam os alunos com o tipo de prática na qual eles podem exercer total controle em elementos construtivos únicos.

A faculdade de engenharia da Universidade da Pensilvânia (Penn State), nos Estados Unidos, mantém um laboratório, o “*The Learning Factory*”, que atua como facilitador entre a universidade e a indústria para integrar o projeto, a fabricação e a atividade comercial dentro da grade curricular. Com modernas dependências e maquinário que incluem CNC, prototipagem rápida, metrologia e CAD/CAM, o laboratório tem experiência, em disciplinas tradicionais, que diretamente preparam o aluno para a carreira profissional. Atualmente conta com uma impressora 3DPrinter (Zcorp Z402), uma de LOM (Helisys 1015) e uma FDM 2000 (Stratasys). A figura 5.3 mostra um trabalho realizado no laboratório, uma réplica do edifício Leonhard, na universidade da Pensilvânia, confeccionado com a tecnologia LOM. Construído em várias seções de aproximadamente 20x15x10 cm cada, e tempo de construção de cada uma de horas, foi todo montado à mão, como requer o processo LOM.



Figura 5.3: Edifício Leonhard na Universidade Penn State, EUA e sua réplica em LOM
Fonte: http://www.me.psu.edu/lamancusa/rapidpro/examples/case_iebuild.htm

O ensino de arquitetura em instituições pelo mundo tem realizado mudanças nas representações em escala, como plantas e maquetes, para a produção de

estruturas e elementos em escala 1:1. Além disso, a intenção de se estudar materiais e processos, como ponto inicial para muitos projetos é facilitado com a utilização da tecnologia da fabricação digital. A prototipagem rápida, que pode produzir maquetes de objetos, mobiliário, maquetes e muitas vezes espaços inacessíveis, tem sido muito utilizada em universidades com resultados extraordinários. Nesses projetos, geralmente, o potencial de informação tecnológica no planejamento e na fabricação é utilizado até seus limites.

Em países da Europa, algumas escolas vêm tentando intensa integração dos computadores com o atelier de projeto. Mesmo assim, ainda não é muito clara como base estrutural de um programa de educação em arquitetura e precisa fundamentalmente mudar para que as novas oportunidades e perspectivas sejam totalmente incorporadas. Segundo Mark et al (2000) um currículo considerado ideal seria aquele que traz a tecnologia do computador para dentro de cursos já existentes gradativamente, ao mesmo tempo em que examina os métodos de ensino de projeto, exercendo a função de catalisador na mudança de perspectivas nas áreas relevantes da metodologia e teoria de projeto.

Com o resultado da tendência de customização (personalização em massa) estabelecida pelo uso das novas tecnologias, existe uma crescente atenção entre arquitetos e estudantes de arquitetura sobre as potencialidades da articulação individualizada dos elementos construtivos relativos à composição e percepção arquitetônica. Neste contexto, os ambientes acadêmicos devem estar preparados para responder ao desafio de dar os primeiros passos com iniciativas que sejam benéficas e estimulem experiências de aprendizado. Ao mesmo tempo, é necessária a instalação de laboratórios com nível de inovação técnica satisfatório, além de formação de grupos de estudo que possam oferecer oportunidades de conectar a pesquisa às disciplinas metódicas.

Os esforços de aprendizado nessa área diferem significativamente de aulas tradicionais de CAD e construção, pois o CAD/CAM depende dos dois mundos, o do desenho e o da manufatura. Com as novas e emergentes tecnologias, o ensino com tecnologia para estudantes de arquitetura atingiu profundas mudanças. Especialmente as que utilizam máquinas CNC e corte a laser, já estão no mercado por algum tempo. Desenvolvimentos recentes na área de software 3D e o aumento da disponibilidade de técnicas de prototipagem rápida têm feito as plataformas baseadas em CAM comuns entre profissionais e instituições de ensino, no exterior. Mais acentuadamente no ano 2000, as técnicas de prototipagem rápida começaram a ser empregadas nos cursos de arquitetura, ocasionando um crescente número de jovens arquitetos têm começado a explorar novos usos criativos para a tecnologia CAM, “transformando” seus conceitos em estruturas tangíveis.

5.3. Estudos de caso

5.3.1. Implantação ISTAR – IST Lisboa

O ISTAR (Laboratório de Investigação em Arquitetura do IST) da Escola de Engenharia do Instituto Superior Técnico de Lisboa (IST), em Portugal, é parte integrante de uma grande estratégia que visava a criação de um conjunto de ferramentas curriculares como suporte ao ensino de arquitetura dentro dos programas de graduação e pós-graduação em Arquitetura neste instituto. Estas ferramentas incluíam diversos cursos para a graduação e pós-graduação, bem como um conjunto de instalações de laboratório. A idéia era criar um ambiente que pudesse disponibilizar ao aluno o estado da arte da tecnologia para o projeto. Por um lado, os laboratórios eram parcialmente inspirados pelo projeto Design Studio of the Future (o atelier do futuro), de William Mitchell e Woody Flowers (Duarte, Bento and Mitchell, 1999), o qual apontava

para a aplicação de como as novas tecnologias poderiam ser incorporadas dentro do ensino e prática de arquitetura. Por outro lado, os laboratórios partiram de conhecimentos, experiências e logística já existentes no IST, particularmente no que se tratava de realidade virtual (PUPO, DUARTE, CELANI, 2008).

Os laboratórios que compõem o ISTAR foram financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia – FCT, órgão financiador de pesquisa em Portugal, e contam com duas linhas de atuação: (1) o Laboratório de Computação em Arquitetura – LAC e (2) o Laboratório de Arquitetura Bioclimática. A abordagem nessa pesquisa se limita na área em que a unidade de equipamentos de arquitetura computacional se insere, o LAC. O laboratório de arquitetura bioclimática não foi abordado nessa tese. Desta forma, para melhor ilustrar as atividades que vêm sendo exercidas no LAC, a descrição dos seus quatro módulos, os equipamentos disponíveis e os software sendo utilizados é apresentada a seguir:

- (1) Módulo de modelagem geométrica avançada – possui ferramentas para o desenvolvimento de modelos digitais e sua manipulação no sentido de efetuar a visualização e análise de projetos. Algumas das ferramentas disponíveis incluem software como AutoCAD, Revit e Rhinoceros;
- (2) Módulo de prototipagem rápida – inclui vários equipamentos de prototipagem rápida (Figura 5.4) como Impressora 3D (Stratasys), Cortadora Laser (Universal Laser), Cortadora de vinil (Rolland), Fresadora (Rolland Modela MDX40) e digitalização 3D (em conjunto com a fresadora). Os *software* de uso dos equipamentos de PR são: Dr. Piccza 3D (controlador do scanner 3D), 3D Editor (edição de dados em 3D), Modela Player 4 (programa de CAM que prepara os desenhos para a fresagem), Virtual Modela (simulador de corte da fresadora), Cut Studio (preparação para cortes a laser) e o Insight (processador de modelos em arquivos STL a serem enviados para a impressora 3D);



Figura 5.4 - Equipamentos do módulo de prototipagem rápida do ISTAR
Fotos: Regiane Pupo

- (3) Módulo de realidade virtual – permite a visualização com diferentes graus de imersão e de interação, a partir de modelos digitais tridimensionais. Estes podem ser usados para testar e estudar soluções construtivas inovadoras e avaliar o impacto de intervenções no ambiente construído (Figura 5.5). A grande vantagem é permitir uma experiência próxima da realidade sem ter que a construir efetivamente;
- (4) Módulo de colaboração remota – fornece os meios necessários para o ensino, aprendizagem e trabalho à distância, se a tarefa de projetar um edifício exigir a colaboração entre diversos especialistas (Figura 5.6).



Figura 5.5 - Equipamento do módulo de Realidade Virtual do ISTAR
Fonte: DUARTE (2007)



Figura 5.6 - Equipamento do módulo de Colaboração Remota do ISTAR
Fonte: DUARTE (2007)

Estes módulos compartilham do mesmo espaço físico e representam o principal suporte para o estúdio digital. Os objetivos do ISTAR são:

- A criação de um laboratório que dê suporte ao ensino de arquitetura e à pesquisa;
- Projetar, implementar e manter um ambiente baseado em WEB que dê suporte à comunidade de estudantes, monitores, professores, egressos e futuros usuários;
- Pesquisar como o computador e a tecnologia da informação podem ser integradas no processo de projeto;
- Desenvolver novas habilidades orientadas às novas soluções na arquitetura e construção;
- Fornecer consultoria e serviços à arquitetura e indústria da construção (AEC).

O ISTAR iniciou suas atividades em 2001, apesar da maioria do equipamento só ter chegado em 2005, e já apoiou 11 trabalhos de graduação, 14 dissertações de mestrado, 7 teses de doutorado, 12 artigos internacionais, 1 prêmio acadêmico, 8 patentes nacionais e um produto em comercialização. As atividades e disciplinas que o laboratório oferece ao curso de Arquitetura do Instituto Superior Técnico proporcionam aos estudantes uma visão privilegiada sobre o impacto das novas tecnologias na teoria

e na prática da arquitetura, o que motivou a sua inclusão entre os 20 cursos internacionais na vanguarda das novas tecnologias, na exposição Spot on Schools, realizada em 2005, em Florença, Itália.

Estágio no ISTAR – IST Lisboa (imersão)

Entre os meses de março e outubro de 2007, com o apoio e financiamento da FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo foi possível um estágio da autora da tese no Instituto Superior Técnico de Lisboa (IST), em Portugal. Sob a orientação e coordenação do professor José Pinto Duarte, as atividades do estágio se dividiram entre (1) a disciplina de DAC II - Desenho Assistido por Computador (Gênese e produção de formas arquitetônicas) e (2) as atividades do ISTAR, o qual se encontrava em fase final de implantação. A participação na referida disciplina se dá em caráter particular e baseado na WEB, onde foram introduzidos os fundamentos teóricos e práticos para exploração dos aspectos computacionais do conhecimento e da forma arquitetônica. Os conceitos básicos da programação em computador foram repassados utilizando uma linguagem com um elevado nível de abstração, utilizando-se exclusivamente a linguagem Autolisp⁴⁴. Paralela e simultaneamente ao acompanhamento da disciplina, todo o processo de implantação, operacionalização e acompanhamento de alunos foi possível de ser efetuado no ISTAR, mais intensamente no módulo de prototipagem rápida, que, naquele momento, necessitava de um apoio mais intenso. Como o objetivo geral do ISTAR é o de promover uma abordagem inovadora ao ensino de arquitetura usando a tecnologia para reforçar o método tradicional de ensino de projeto, diversas experiências com os equipamentos de prototipagem rápida disponíveis permitiram a comprovação da sua importância no processo de projeto arquitetônico.

⁴⁴ *AutoLisp*: baseado na linguagem de programação LISP (List Programming)

Dentre elas, talvez a de maior repercussão tenha sido o acompanhamento do Concurso Festival do TAXI. O evento, patrocinado pelo '*Institut pour la ville en mouvement*', da França, previa diversas atividades sobre o uso do táxi na cidade de Lisboa. Uma das atividades foi destinada a alunos de arquitetura e desenho industrial de todo o país, com o objetivo de projetar um ponto de táxi inovador, com tecnologia e que pudesse sanar todas as expectativas tanto dos usuários quanto dos profissionais envolvidos. O ISTAR foi o laboratório escolhido pela comissão organizadora para o acompanhamento desses projetos na eventual necessidade de maquetes prototipadas durante o processo de projeto e, mais intensamente, na etapa final do concurso. Pelo regulamento do concurso, os cinco finalistas tinham o direito de ter suas propostas prototipadas em escala reduzida (1:20) no ISTAR e o primeiro lugar ainda contava com a execução de seu projeto, em tamanho real, em equipamento CNC, construído pela Escola Superior de Tecnologia de Viseu (ESTV) – Departamento de madeiras, e acompanhada pelos alunos. As figuras 5.7 e 5.8 mostram dois projetos finalistas cujas maquetes foram totalmente executadas pelo ISTAR, utilizando os processos FDM e cortadora laser.



Figura 5.7: Maquete 1º prêmio, Taxi Stand
Lisboa, 2007
Alunos: Andre Sousa, Ana Rita Silva e Emanuel Moita
(Universidade de Lisboa Faculdade de Belas Artes)
Foto: Regiane Pupo



Figura 5.8: Maquete Menção honrosa, Taxi Stand,
Lisboa, 2007
Alunos: Ana Rita Antunes, Joana Rodrigues e Luís
Ferreira
Foto: Regiane Pupo

A importância desse estágio para o desenvolvimento e conclusões desta tese está ligada diretamente à utilização dos métodos computacionais disponíveis, não apenas como representação, mas efetivamente no processo de projeto, na geração das formas, etc. Além disso, na visão do campo mais técnico, a absorção de conhecimento na operação de máquinas de prototipagem rápida durante o estágio e a forma com que se conduz um laboratório dessa natureza, foi de fundamental importância para a operacionalização e funcionamento do LAPAC. Existiu, e ainda existe, uma conexão muito positiva de interesses, competências e valores que é compartilhada entre os dois laboratórios. Por isso, é essencial que se entenda a composição, as características e as produções executadas pelo ISTAR durante e depois de sua implantação.

5.3.2. Implantação LAPAC FEC - UNICAMP

Criação do laboratório de Prototipagem Rápida da FEC - LAPAC

O Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção (LAPAC) foi criado na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da UNICAMP em janeiro de 2007, por meio de auxílios da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). A FAPESP financiou a compra dos primeiros equipamentos, bem como gastos relativos à instalação de sistemas de exaustão e ar condicionado, e o material de consumo para as primeiras pesquisas, por meio de um projeto temático (processo #04/15737-0) cuja linha de pesquisa é o processo de projeto em arquitetura. Além disso, a FAPESP também financiou a compra de computadores, mesas digitalizadoras e *software* para o laboratório. No final de 2007, por intermédio do Edital Equipamento Multi-Usuário da CAPES, o laboratório recebeu um auxílio para a compra de uma fresa de controle numérico (CNC).

O LAPAC é equipado com (1) uma impressora 3D (ZCorp 310), (2) uma cortadora a laser (Universal Laser System X660) e (3) uma fresadora CNC de grande formato (1.80x2.80m), em processo de aquisição (Figura 5.9). Enquanto a impressora 3D e a cortadora a laser destinam-se à produção de modelos em escalas reduzidas, a fresadora CNC permitirá novos experimentos de produção de elementos construtivos e protótipos em escala real. A digitalização 3D é feita com o sistema *David Laser Scanning*, um programa de computador que permite a aquisição de dados 3D sem a necessidade de equipamentos especiais, utilizando somente um feixe laser e uma *web-cam*. Com recursos do projeto temático, o LAPAC acaba de adquirir um completo programa de digitalização 3D, o Photomodeler. Além dos equipamentos citados, o LAPAC conta com 2 mesas digitalizadoras, 4 computadores portáteis, 6 computadores de mesa, uma impressora e um scanner A3. Os *software* à disposição dos usuários são AutoCAD, Rhinoceros, ParaCloud e Pepakura, além dos programas específicos de cada equipamento de prototipagem rápida.



Figura 5.9: Impressora 3DP ZCorp 310 (esquerda) e Cortadora a Laser Universal X660 (direita)
Fotos: Regiane Pupo

Apoio de outros laboratórios

O LAPAC tem efetuado alguns convênios com outros laboratórios já implantados, com grupos de pesquisa relacionados e com universidades que se interessam na pesquisa e desenvolvimento de técnicas que incluem prototipagem e

fabricação digitais. Os convênios incluem intercâmbio de alunos e professores, troca de serviços como impressões 3D, digitalizações e experiências diversas, além de trabalhos conjuntos enviados à congressos. A seguir, são listados os cinco laboratórios com os quais o LAPAC mantém parceria desde o início de suas atividades.

- **CTI** - O primeiro laboratório com o qual o LAPAC estabeleceu contato e um programa de parceria foi o CTI - Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, antigo CenPRA, em Campinas, do Ministério da Ciência e Tecnologia. O laboratório do CTI, atualmente DT3D – Divisão de Tecnologia 3D, possui diversos equipamentos de prototipagem rápida (SLS, 3DP e FDM) e desenvolve pesquisas sobre a aplicação dessa tecnologia em diferentes áreas, em especial na medicina e odontologia. Além de apoiar projetos com a impressão de maquetes em técnica de sinterização seletiva a laser para projetos de pesquisa desenvolvidos pelos pesquisadores do LAPAC, o CTI tem assessorado a equipe do LAPAC com respeito à manutenção de máquinas e obtenção de material de consumo. Além disso, tem auxiliado o LAPAC no sentido de prototipar modelos com a utilização de seus equipamentos, quando as técnicas disponíveis no LAPAC não são adequadas ao que se necessita fazer. Como exemplo prático, pode-se citar um dos projetos de extensão desenvolvidos recentemente pelo LAPAC, que foi a criação de uma maquete do campus da Unicamp. Em escala 1:2000 (Figura 5.10), todo o terreno foi cortado e montado no LAPAC, utilizando a cortadora a laser em placas de material laminado. Para a impressão dos prédios da maquete, após testes na impressora 3D do LAPAC, verificou-se que essa tecnologia não seria a ideal pela fragilidade do seu material. Com um total de 476 edificações, todos foram prototipados pelo CTI, em SLS, técnica que possibilita a produção de peças muito mais robustas e duráveis. Essa colaboração foi muito importante para a confirmação de que muitas vezes as técnicas disponíveis nem sempre são as mais indicadas para um objetivo específico, justificando os acordos de convênios e parcerias com outros laboratórios.

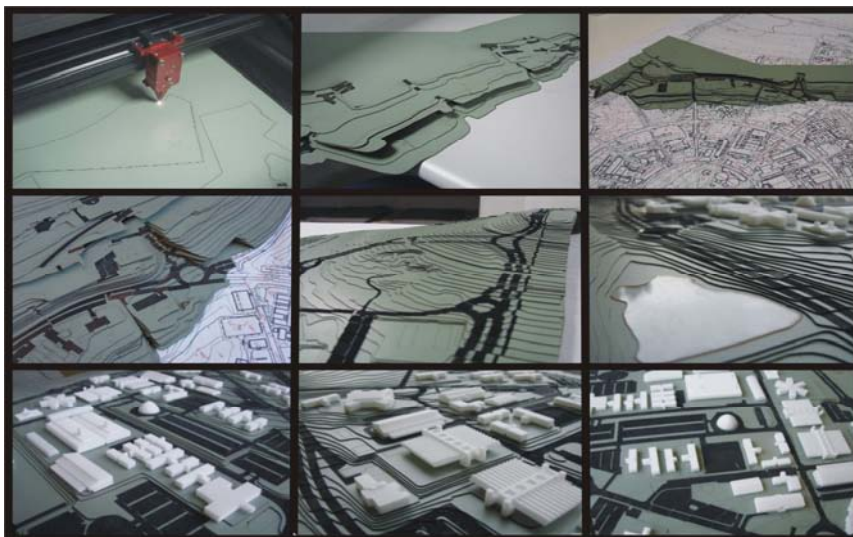


Figura 5.10: Maquete da Unicamp confeccionada em laminado (terreno) e SLS (edificações)
Fotos: Regiane Pupo

- **PROPAR:** O LAPAC está participando de uma proposta para o edital CAPES/FCT juntamente com o professor Benamy Turkienicz, do PROPAR - Programa de pós-graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), visando a realização de pesquisas conjuntas nas áreas de fabricação digital e *computational design*. Em setembro de 2008 o LAPAC recebeu cinco alunos da graduação do curso de arquitetura desta universidade, que participaram de um *workshop* ministrado pelo LAPAC e que fazia parte das experiências dessa tese de doutorado, onde tiveram a oportunidade de conhecer as técnicas e equipamentos disponíveis. Os resultados dessa experiência podem ser constatados mais à frente nesse mesmo capítulo.

- **LOPCA** - Para viabilização de algumas pesquisas de iniciação científica e de extensão em andamento no LAPAC, foi firmado um acordo com Laboratório de Otimização, Projeto e Controle Avançado, da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP, por intermédio do pós-doutorando André Jardini. O acordo prevê a participação do LOPCA no trabalho de digitalização 3D das esculturas da Pinacoteca do Estado, um dos trabalhos de extensão do LAPAC. As esculturas serão posteriormente produzidas em escala na impressora 3D. O LOPCA possui um equipamento de digitalização que utiliza tecnologia de luz estruturada que será útil para esse trabalho, visto que o LAPAC não possui esse tipo de equipamento.

- **LAME** - o Laboratório de Modelos e Ensaios da FAU-USP Faculdade de Arquitetura e urbanismo da Universidade de São Paulo, por intermédio de seu coordenador associado, o prof. Arthur Hunold Lara, também é um dos laboratórios conveniados com o LAPAC. A FAU pretende realizar investimentos em equipamentos de CNC para seu curso de Design e a troca de conhecimento entre os dois laboratórios será de suma importância. Ainda não houve nenhuma experiência prática com esse laboratório visto que ainda não adquiriram nenhum equipamento.

- **ISTAR** – O Laboratório de Investigação em Arquitetura do Instituto Superior Técnico de Lisboa (IST) e Universidade Técnica de Lisboa (UTL), em Portugal, com colaboração do professor José Pinto Duarte, estão firmando um acordo de cooperação com o LAPAC que permitirá o intercâmbio de alunos de pós-graduação e colaboração na orientação de teses. Além disso, o prof. Duarte também faz parte do projeto em solicitação a CAPES/FCT juntamente com o PROPAR, da UFRGS. A troca de experiências com o ISTAR também resultou na constatação de algumas indicações sobre os diferentes equipamentos disponíveis em cada laboratório. Em 2007, os dois laboratórios desenvolveram um experimento conjunto, que visava a impressão 3D de uma treliça, utilizando um aplicativo desenvolvido pelo LAPAC. O aplicativo destina-se à criação de treliças irregulares a partir de treliças 3D, em linguagem VBA (*Visual Basic Application*), para AutoCAD. A mesma treliça com as mesmas espessuras e escala foi impressa em gesso, na impressora 3DPrinter ZCorp 310, no LAPAC e em plástico ABS na Stratasys Prodigy Plus, em sistema FDM, no ISTAR (Figura 5.11).

Este experimento visava o simples entendimento de dois processos distintos para a execução de um mesmo modelo digital, e não o de análise estrutural nem de resistência. Os resultados obtidos foram satisfatórios quanto à treliça que foi impressa no processo 3DP, no LAPAC, ainda que com uma fragilidade inerente às espessuras estabelecidas. Já o resultado da impressão no processo FDM, no IST, sofreu diversas rupturas durante sua construção com um gasto de material de suporte muito superior ao da própria peça, além do tempo de impressão ser extremamente longo: 12 horas. Foi

concluído que o processo FDM não é o ideal para a construção de objetos com as características similares ao do exercício proposto. A partir desse experimento foi possível comprovar que para alguns processos é necessária a criação de uma base de dados sobre as técnicas mais apropriadas a cada tipo de maquete. Com este auxílio, os alunos não precisariam realizar testes desnecessários para decidirem as técnicas a serem utilizadas em suas maquetes.

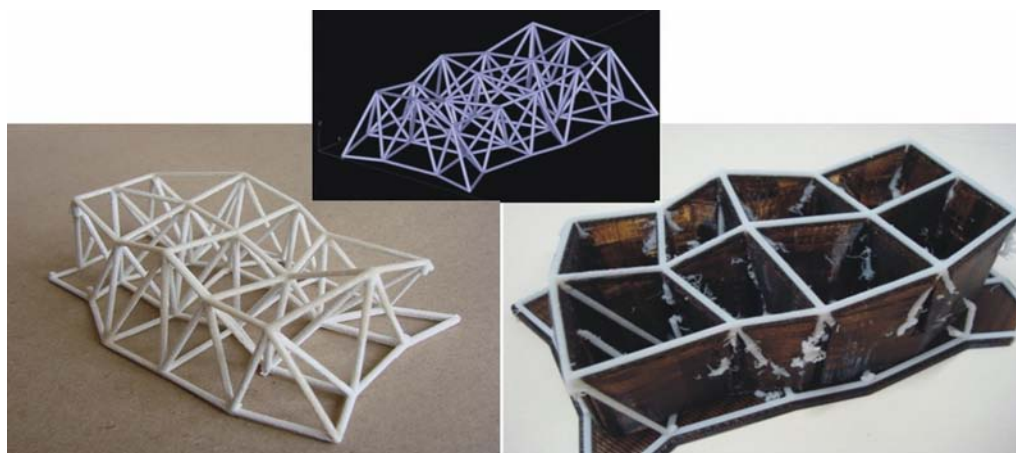


Figura 5.11 - Trelças confeccionadas no processo 3DP – LAPAC (esq.) e no processo FDM – IST (dir.)
Fotos: Regiane Pupo

Operacionalização do LAPAC

Por se tratar de um laboratório de pós-graduação, o LAPAC tem como objetivo principal a formação de pessoal para o ensino superior e não a prestação de serviços a empresas privadas. Dessa forma, as pesquisas e a tecnologia desenvolvidas no LAPAC ficam restritas ao meio acadêmico, não havendo uma extensão direta à sociedade. Seus pesquisadores têm recebido bolsas da FAPESP, CAPES, CNPq e SAE-UNICAMP e o LAPAC tem planos de se tornar um laboratório de referência em sua área, oferecendo treinamento a professores e alunos da UNICAMP e de outras instituições de ensino. O laboratório possui ainda uma *website* no endereço <http://www.fec.unicamp.br/~lapac>, na qual há informações sobre o preparo dos arquivos, o uso dos equipamentos e a agenda de reserva do uso dos mesmos.

Atualmente, o LAPAC possui 4 monitores (bolsistas SAE-UNICAMP) que oferecem atendimento a seus usuários (alunos de pós-graduação da FEC, de outras unidades e do último ano da graduação do curso da arquitetura), em um regime de agendamento por e-mail, além de desenvolverem projetos de extensão à comunidade que estejam ligados à pesquisa. No caso de atendimento aos alunos da FEC, os serviços com a cortadora a laser, sem custo de operacionalização, devem trazer o próprio material de corte que vão utilizar.

Já na utilização da impressora 3D, a ZCorp 310, os custos estabelecidos para a construção de peças prototipadas englobam o pó de gesso e o aglutinante (*binder*) gastos para a impressão de cada peça. O *software* de impressão da própria máquina (Zprint) fornece informações emitindo um relatório a cada impressão efetuada, o que possibilita o controle de algumas variáveis que podem ser importantes quanto à usabilidade do equipamento. Essas variáveis medem o tempo de impressão, o volume da peça prototipada (em cm³), a quantidade de líquido aglutinante utilizado (em ml), o número de camadas sobrepostas e a área da superfície (em cm²). No LAPAC, o custo, por volume impresso, do pó foi estimado em R\$0,40 por centímetro cúbico e o de aglutinante R\$1,00 por mililitro, acrescidos de 10%. Esse acréscimo se refere ao gasto a mais de líquido aglutinante que a máquina efetua na limpeza do cabeçote, simultaneamente à impressão. Esse valor só pôde ser definido devido à diferença nos dados fornecidos pela máquina antes e depois das impressões. Na verdade, todos esses valores estabelecidos envolvem, além do custo desses dois materiais, as taxas de importação e transporte até o Brasil. Estes valores, após cada impressão, são lançados em uma planilha que já fornece os custos que o aluno deve depositar.

Dentre as pesquisas diretamente ligadas à prototipagem e fabricação digitais, o LAPAC já desenvolveu nove trabalhos de iniciação científica, com alunos de graduação em arquitetura e com o auxílio de bolsas FAPESP, CAPES, CNPq e SAE-UNICAMP, como relatados e ilustrados no Apêndice V. Os trabalhos de IC têm demonstrado a importância da pesquisa na vida acadêmica de nossos alunos. De uma maneira geral,

as experiências realizadas no LAPAC seriam dificilmente abordadas em estágios em escritórios de arquitetura ou mesmo em outros centros de pesquisa sem a experiência e *know-how* que o LAPAC vem reunindo desde o início de suas atividades.

Os projetos de extensão à comunidade são em geral trabalhos de outras unidades da Unicamp, ou de instituições que tenham um vínculo com a Unicamp, ligados diretamente à pesquisa. Geralmente, nesse tipo de serviço, o “cliente” discute com a equipe do LAPAC seu projeto e suas necessidades, que irá elaborar um projeto de maquete, que inclui quantidades, custos de material e prazos. Cabe à equipe do laboratório escolher a melhor técnica a ser utilizada para os serviços encomendados. Após a aprovação, a compra do material é de total responsabilidade do cliente que irá entregá-lo no LAPAC. A equipe de estagiários do LAPAC então, supervisionada pela professora coordenadora do laboratório, procede na elaboração dos desenhos, produção e montagem das maquetes encomendadas. No caso de falta de material durante sua execução, o cliente é informado e o serviço só é continuado quando esse material chegar ao LAPAC.

Os projetos de extensão visam a integração com a comunidade acadêmica da Unicamp, bem como outros centros acadêmicos que necessitem da maquete como visualizador e facilitador do entendimento espacial pelo uso do objeto tridimensional. O LAPAC conta atualmente com quatro trabalhos de extensão, como descritos e ilustrados no Apêndice VI. Os exemplos de trabalhos de iniciação científica e de extensão à comunidade demonstram que há diversas possibilidades de aplicação das técnicas a serem utilizadas. Algumas delas já foram ou estão sendo testadas pela equipe, em especial na área de produção de maquetes e protótipos com diferentes finalidades. Nas próximas etapas, o LAPAC pretende desenvolver prioritariamente estudos de aplicação nas áreas ainda não testadas, incluindo aplicações de equipamentos CNC, para a confecção de protótipos e de peças para o uso direto na construção.

6. Experimentos Pedagógicos

*"You can have your cake and eat it too;
You can have one apartment that is two too;
You can have a door that's a table too;
You can make a tub that's a bed too;
You can live in composites and feel them too;
You can have your digital design and build it too".*
(Sulan Kolatan, architect)

6.1. Transferência de tecnologia - Workshops ministrados

Não é possível alcançar bons resultados na formação de arquitetos somente com a utilização de *software* de modelagem e equipamentos de prototipagem sofisticados. O desenvolvimento cuidadoso das etapas de projeto e um cronograma para o desenvolvimento de ciclos é necessário para que se obtenham produtos finais interessantes (Stellingwerff, 2005). Da mesma forma que a inserção das técnicas de computação na grade curricular de arquitetura foi discutida no Brasil no início da década de 90, as chamadas técnicas de prototipagem e fabricação digitais têm, hoje, um papel decisivo na qualidade de ensino e abrem um leque de possibilidades projetuais jamais alcançadas anteriormente. Para que essa atualização ocorra de forma gradual, e ao mesmo tempo completa, o constante treinamento e atualização de professores e alunos sobre as mais recentes, e disponíveis, tecnologias são fundamentais. O LAPAC é o único laboratório de prototipagem e fabricação digitais para arquitetura em uma universidade brasileira e já conta com uma série de treinamentos realizados, difundindo o conhecimento e o exercício das novas tecnologias no processo de projeto.

6.1.1. Workshops para professores e alunos da FEC

O LAPAC já ofereceu nove *workshops* desde a sua implantação, em 2007. O primeiro deles ocorreu durante a Semana de Engenharia, em 2007, onde os alunos tiveram a oportunidade de ter o primeiro contato com as máquinas de prototipagem digital disponíveis no laboratório. Com o objetivo de difundir mais intensamente as tecnologias disponíveis no LAPAC entre professores e alunos da FEC, enquanto auxiliava na elaboração e análise de um experimento prático para esta tese, em março de 2008 iniciou-se uma seqüência de seis *workshops* nas dependências do LAPAC (Figura 6.1). O conjunto de *workshops*, que contou com 56 participantes, entre alunos do último ano do curso de Arquitetura, alunos da pós-graduação e professores da FEC, teve carga horária de 8 horas cada. Neste período, as atividades se dividiram entre teoria e prática da prototipagem rápida para a arquitetura. As quatro primeiras horas eram destinadas à (1) transferência da teoria e estado da arte da prototipagem rápida utilizada atualmente para a arquitetura e (2) elaboração e modelagem de um objeto a ser prototipado na impressora 3DPrinter, com o grupo dividido em pequenas equipes. Enquanto a peça era produzida pela máquina, as quatro horas restantes eram dedicadas ao treinamento com a cortadora a laser. Ao final, o pós processamento do objeto obtido na 3DPrinter e a montagem da peça produzida na cortadora a laser encerravam as atividades de cada *workshop*. O formato dos *workshops* possibilitou que os participantes tivessem, primeiramente, uma abrangência teórica, quanto ao estado da arte de prototipagem e fabricação digitais para arquitetura hoje, além de conhecer os equipamentos disponíveis e trabalhos efetuados no LAPAC. Em uma segunda etapa, as atividades incluíram alguns exercícios de modelagem 3D para posterior impressão nos equipamentos disponíveis no LAPAC.

Os objetivos principais dessa forma de abordagem são: (1) a integração das novas tecnologias ao processo de projeto, (2) o desenvolvimento de novo

conhecimento orientado para novas soluções arquitetônicas e construtivas e (3) a operacionalidade dos equipamentos disponíveis.



Figura 6.1 : Workshops do LAPAC
Fotos: Regiane Pupo

Durante os exercícios, os participantes, divididos em pequenos grupos, foram instruídos a “desafiar” a máquina elaborando propostas de modelagem que fossem impossíveis de serem produzidas sem os equipamentos de prototipagem rápida, pelo menos em tão pouco tempo. Fatores como espessuras de paredes, dimensões dos objetos, previsão de orifícios para a retirada de pó sobressalente e as regras básicas para a transformação dos modelos 3D em arquivos STL foram repassadas e discutidas. Para a impressão 3D, em gesso, na máquina ZCorp 310, as instruções eram: (1) poderiam gerar suas idéias de modo intuitivo e abstrato, ou (2) poderiam utilizar algum projeto já existente, construído, e de difícil construção, para uma modelagem conceitual. Os *software* disponíveis para esta etapa foram o AutoCAD 2005 e o Rhinoceros R4, ambos instalados no LAPAC. Foi muito interessante como os grupos discutiam o processo de modelagem e impressão tridimensional visando maior otimização de material, tempo de impressão, sustentabilidade e robustez da peça

durante a sua concepção. A figura 6.2 mostra os doze trabalhos gerados pelos grupos nestes os *workshops*, onde se pode notar o grau de abstração e ao mesmo tempo de desafio quanto às possibilidades e capacidades do equipamento de impressão 3D, uma tecnologia nova para a maioria.

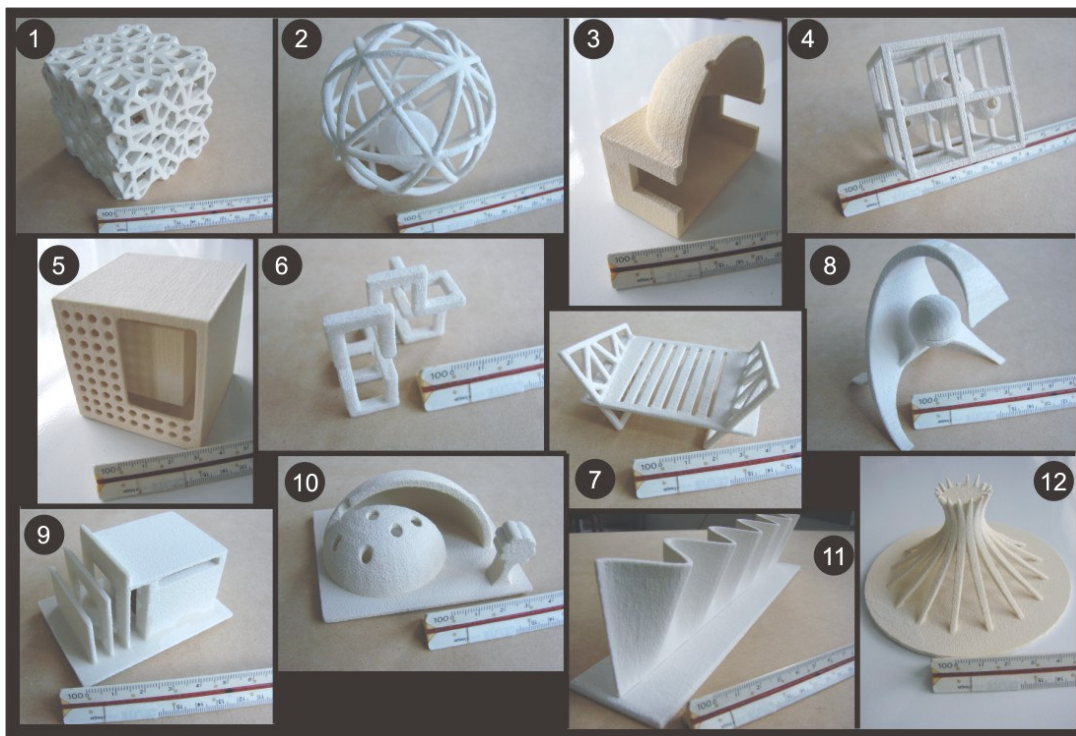


Figura 6.2: Todos os trabalhos produzidos durante os workshops
Fotos: Regiane Pupo

Dois grupos distintos seguiram uma abordagem mais perto da realidade do espaço construído desafiando a impressão 3D com a modelagem de dois projetos já existentes: (1) a igreja em Atlântida, Uruguai (1958), de Eladio Dieste, mostrado na figura 6.3 ao lado da sua maquete prototipada em gesso, na figura 6.4 e (2) a catedral de Brasília (1958-1970), de Oscar Niemeyer, ilustrado na figura 6.5 com sua maquete, também em gesso, na figura 6.6.



Figura 6.3: Igreja em Atlântida, Uruguai
Eng. Eladio Dieste
Fonte: <http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/esp470.asp>

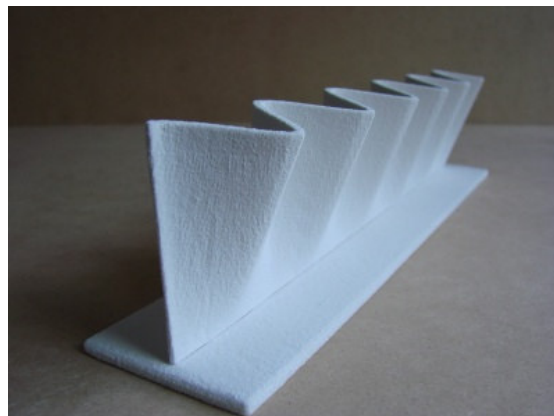


Figura 6.4: Peça prototipada em gesso – ZCorp 310
Alunas: Maria Beatriz Andreotti e Mariana Ramos
Foto: Regiane Pupo



Figura 6.5: Catedral de Brasília
Arquiteto Oscar Niemeyer
Fonte: http://www.geocities.com/TheTropics/3416/photo_catedral_1988.htm



Figura 6.6: Peça prototipada em gesso – ZCorp 310
Alunos: Izabella Maciel e Renan Torricelli
Foto: Regiane Pupo

Talvez o maior benefício dos *workshops* tenha sido o efeito informacional. Os participantes admiravam a sequência de impressão à medida que a concretização de seus projetos, que acabavam de ser modelados no CAD, minutos antes, eram produzidos com uma perfeição invejável. Ao mesmo tempo, puderam vivenciar que um elemento ainda não está terminado só porque o botão de ligar é apertado, como em um processo automático. Todo o processo agora, desde a modelagem até o pós-processamento, envolve também o projeto da maquete, que depende do conhecimento e informação de uma ferramenta nova. Com isso tiveram a idéia dos diversos tipos de problemas que podem se deparar desde a concepção até a produção do projeto.

Todas as peças desenvolvidas nos *workshops* tiveram um acompanhamento quanto às diversas variáveis que puderam ser discutidas posteriormente pela equipe. O peso das peças foi obtido com uma balança de precisão, após a conclusão da impressão, e já pós-processada, ou seja, sem resíduos de pó e sem qualquer outro tipo de acabamento. As demais informações, como tempo de impressão, volume e quantidade de aglutinante (*binder*) gasto, são obtidas por meio de um controle do *software* da máquina que emite relatórios antes e depois de cada impressão. A tabela 9 informa a descrição dessas variáveis para cada peça prototipada, bem como as informações do custo individual.

Tabela 6.1: Conjunto de variáveis para cada peça prototipada, workshop FEC

Peça #	Tempo de impressão	Peso (gr.)	# Layers	Binder (ml)	Volume (cm ³)	Superfície (cm ²)	Pó R\$ 0.40/cm ³	Binder R\$ 1/ml +10%	Total R\$
1	1h 48'	83	671	57.9	44.59	529.37	17.84	63.69	81.53
2	1h 58'	30	732	51.9	16.39	177.37	6.56	57.09	63.65
3	1h 01'	58	369	34.7	36.23	233.27	14.49	38.17	52.66
4	1h 34'	12	590	43.2	16.44	243.65	6.58	47.52	54.10
5	1h 34'	52	590	46.9	26.51	550.58	10.60	51.59	62.19
6	1h 14'	6	511	34.8	7.68	76.80	3.07	38.28	41.35
7	1h 3'	15	423	29.3	7.44	112.56	2.97	32.23	35.20
8	2h 9'	20	432	11.9	10.81	98.31	4.32	13.09	17.41
9	57'	44	391	33.6	25.33	218.19	10.13	36.96	47.09
10	1h 3'	63	396	38.5	37.98	255.93	15.19	42.35	57.54
11	1h 14'	100	423	41.9	49.99	514.31	20.00	46.09	66.09
12	1h 29'	59	515	46.4	33.82	292.63	13.53	51.04	64.57

* os números das peças são equivalentes às imagens da figura 123

Ao se observar os custos da tabela acima, nota-se que os valores ainda são altos se comparados a outros procedimentos manuais de execução de protótipos. Vale lembrar que se trata de uma tecnologia nova, ainda dependente de suprimentos importados, mas com a precisão e rapidez de produção garantidas. Os serviços oferecidos pelo LAPAC ainda não podem ser destinados para uso comercial, mas sim

para uso exclusivo a pesquisas de pós-graduação, de iniciação científica e pesquisa em geral. Portanto, esses valores são exclusivamente relacionados com os custos que o laboratório despende em materiais. Como análise comparativa, foi necessário comprovar se esses valores estabelecidos estavam dentro da realidade de mercado quando comparados a empresas de terceirização desses serviços. Para isso, foi efetuado um orçamento da peça de número 11, a Igreja em Atlântida, Uruguai, em um birô⁴⁵ de serviços de impressão 3D, localizado em São José dos Pinhais, Paraná, utilizando o mesmo arquivo e o mesmo equipamento, a ZCorp 310. Enquanto os custos estabelecidos pelo LAPAC para a construção dessa peça foram de R\$ 66,09, como demonstrado na tabela 9, acima, a empresa prestadora de serviços orçou em R\$ 250,00, com frete incluído e sem qualquer tipo de pós-processamento aplicado. Fica comprovado que o LAPAC, mesmo sem prejuízos, ainda consegue estabelecer valores acessíveis quando há a necessidade de um produto com essas características e em curto prazo.

6.1.2. Workshops para alunos de outras instituições

Durante a última semana da arquitetura da FEC, em outubro de 2008, o LAPAC realizou um *workshop* com alunos da Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT) e da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), atendendo um total de nove alunos. A vinda desses alunos faz parte das atividades do LAPAC em manter convênios e intercâmbios com alunos e pesquisadores de outras universidades que necessitem de apoio quanto às experiências já adquiridas pelo LAPAC. Os alunos tiveram a oportunidade de ter contato com os equipamentos disponíveis no laboratório, nos mesmos moldes do *workshop* anterior, ou seja, com abordagens teórica e prática em um período de 8 horas e a mesma orientação para a escolha dos exercícios. Nesse

⁴⁵ Birô de serviços de impressão 3D: www.funcionalprojetos.com.br

caso, cada equipe ficou responsável pelo uso de um dos dois equipamentos do LAPAC. Coube à equipe da UFRGS a impressão em 3D, na impressora 3D ZCorp (Figura 6.7) e a equipe da UFMT a utilização da cortadora a laser, construindo parte do campus de sua universidade, localizado em Cuiabá (Figura 6.8).



Figura 6.7: impressão 3D
Museu Guggenheim NY
Equipe da UFRGS
Foto: Regiane Pupo



Figura 6.8: Corte a laser e montagem
Campus da UFMT
Equipe da UFMT
Foto: Regiane Pupo

6.1.3. Workshop em congresso

Um terceiro tipo de *workshop*, seguindo a seqüência de 2008, foi ministrado durante o P&D Design 8 – Oitavo Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, sediado no SENAC, em São Paulo, em outubro de 2008. Destinado a professores, estudantes e pesquisadores de design industrial e arquitetura, este mini-curso teve como diferencial a transmissão do processo de impressão por meio de *Web-Cam*, via internet, em tempo real, nos equipamentos do LAPAC, pois o local do evento não possuía os equipamentos de prototipagem necessários para a produção das peças.

Como nos *workshops* anteriores, os participantes tiveram a oportunidade de interação com as novas técnicas de confecção de protótipos e maquetes por meio de aula expositiva e, depois da elaboração dos exercícios, puderam ter o contato visual com as impressões tridimensionais no LAPAC. A transmissão ocorreu de forma muito satisfatória e os alunos participaram da impressão de modelos nas técnicas de impressão 3D (ZCorp) e corte a laser (Universal Laser Systems). As figuras 6.9 e 6.10 ilustram a transmissão entre o LAPAC, em Campinas e o SENAC, em São Paulo, para a impressão dos trabalhos desenvolvidos durante o *workshop*. A transmissão foi possível utilizando-se o programa Skype⁴⁶ que permite a troca de dados como som e imagem simultaneamente, em tempo real.

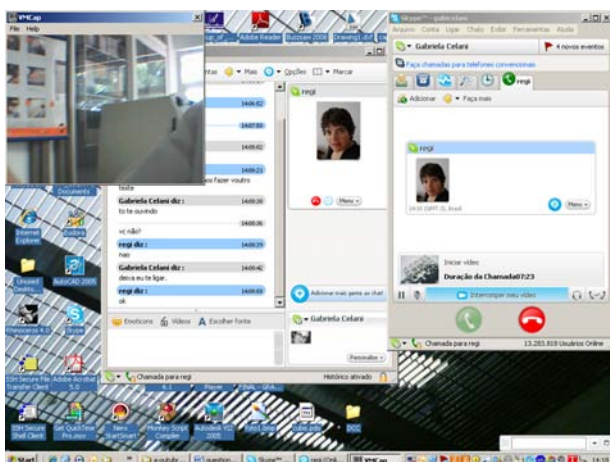


Figura 6.9: Tela de apresentação do programa Skype utilizado na transmissão



Figura 6.10: Tela mostrando a comunicação online, em tempo real entre o LAPAC e o SENAC

Os trabalhos resultantes dessa experiência estão demonstrados na figura 6.11. Depois de prototipados no LAPAC, os trabalhos foram expostos no evento (figura 6.12), um dia após a realização do *workshop*. Nesse momento, os participantes do *workshop*, bem como todos os participantes do evento, puderam observar o resultado físico das modelagens, fato que obteve grande repercussão dentre os participantes da conferência.

⁴⁶ Skype: www.skype.com



Figura 6.11: Trabalhos modelados durante o Workshop e prototipados no LAPAC-Unicamp



Figura 6.12: Exposição dos trabalhos no evento P&D após o workshop

Os parâmetros de impressão referentes às peças produzidas pelos participantes deste *workshop* estão demonstrados na tabela 10.

Tabela 6.2: Conjunto de variáveis para cada peça prototipada, *workshop* do P&D

Peça #	Tempo de impressão	Peso (gr)	# Layers	Binder (ml)	Volume (cm3)	Superfície (cm ²)	Pó R\$ 0.40/cm ³	Binder R\$ 1/ml + 10%	Qtd	Total R\$
1	1h12'	18	490	34.8	11.42	74.52	4.57	38.28	1	42.85
2	2h02'	108	786	61	31.90	404.74	12.76	67.10	1	79.86
3	59'	60	353	32.7	37.05	246.5	14.82	35.97	1	50.79
4	38'	16	234	17.1	10.13	60.33	4.05	18.81	1	22.86
5	1h18'	25	511	37	13.44	161.87	5.38	40.70	1	46.08
6	20'	2	147	9.5	1.35	11.13	0.54	10.45	9	98.91
7	26'	11	165	12.3	7.67	70.02	3.07	13.53	1	16.60
8	46'	11	325	23	6.46	65.69	2.58	25.30	1	27.88
TOTAL				227.4	119.42	1094.8	47.77	250.14	16	297.91

* os números das peças são equivalentes às imagens da figura 132

6.2. Acompanhamento dos trabalhos de TFG da FEC após a transferência de tecnologia

O início das atividades do LAPAC, em 2007, estimulou a utilização da maquete, como parte do projeto do Trabalho de Final de Graduação (TFG), dos alunos do sexto ano do curso de arquitetura da FEC. As técnicas recém adquiridas e disponíveis no laboratório, agregadas às já existentes na maquetaria, incentivaram o uso das maquetes físicas, acumulando uma riqueza de detalhes, precisão e informações inerentes ao projeto até então não muito exploradas com as tradicionais pranchas ou maquetes volumétricas.

Em 2008, já com as máquinas instaladas e trabalhando em sistema de agendamento, o interesse dos alunos foi espontâneo, proporcionando ao LAPAC em participar diretamente da elaboração de 23 dos 36 trabalhos inscritos no TFG, entre a cortadora a laser e a impressora 3D. Não há dúvidas que os *workshops* do início do ano, que também faziam parte dos experimentos desta tese de doutorado e de uma política de disseminação da tecnologia de prototipagem digital do LAPAC, estimularam, e muito, os alunos do último ano a utilizar as tecnologias disponíveis. A cortadora a laser foi o equipamento mais procurado entre os alunos de TFG, pela sua facilidade de manuseio além da possibilidade de utilização de uma gama de materiais que justificava o seu uso. O LAPAC tem fornecido aos alunos do TFG, sem custo, papelão ondulado, gentilmente cedido por uma empresa da região, o que também estimulou o uso da cortadora. Dentre os demais materiais utilizados, trazidos pelos alunos, estão o MDF (3 e 6 mm), papelão Paraná e Roller e cortiça (Figura 6.13). O uso da cortadora a laser foi oferecido sem a cobrança de qualquer taxa. Já o uso da impressora 3D foi oferecido com a exigência de pagamento de uma taxa de material proporcional ao volume da peça impressa, uma vez que se trata de material caro e que não se dispunha de estoque suficiente para uso ilimitado. Como consequência da cobrança dessa taxa, a impressora 3D foi minimamente utilizada pelos alunos.

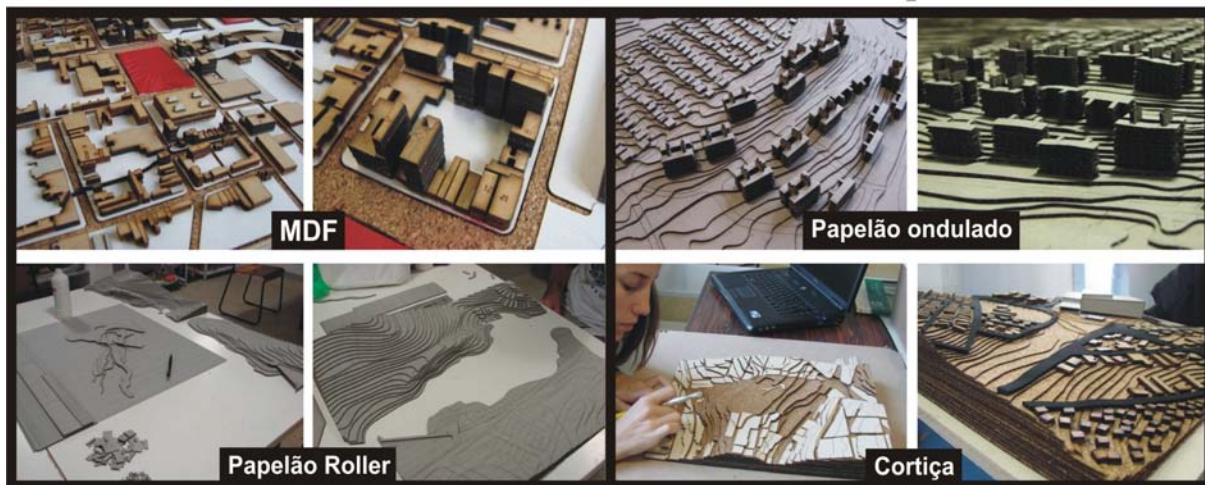


Figura 6.13 – Diversidade de materiais utilizados na cortadora a laser para a elaboração das maquetes de TFG
Fotos: Regiane Pupo

Sem dúvida, a possibilidade de utilização de novos materiais, a precisão do corte e a perfeição dos encaixes fizeram da cortadora a laser uma ferramenta aliada e muito utilizada, minimizando tempo, aumentando a produtividade e, conseqüentemente, enriquecendo a qualidade dos trabalhos. O desenvolvimento de um projeto através de uma maquete física, tridimensional, proporcionou a identificação de problemas e soluções que a maquete eletrônica não conseguia, além da colaboração na percepção espacial, na estética e na funcionalidade do projeto, como demonstrados nos exemplos a seguir.

Um acompanhamento dos trabalhos finais de graduação do ano de 2008, desde as primeiras fases até as entregas finais, foi importante para que se pudesse ter a idéia do impacto da nova tecnologia na evolução, projetual e representacional, nos trabalhos dos alunos. A análise feita não teve caráter estatístico e sim qualitativo. Com isso, quatro trabalhos foram escolhidos e acompanhados desde as primeiras experiências com os novos equipamentos até a entrega final: (1) "Terminal Intermodal para Córdoba", do aluno Luís Fernando Milan; (2) "Hotel de Negócios para o Pólo Tecnológico de Campinas", da aluna Mariana Ramos; (3) "Caminhos à deriva: novas cartografias em um conjunto habitacional", da aluna Maria Julia Mazetto e (4) Giramundo, Teatro de bonecos, da aluna Izabela Maciel. A escolha desses quatro

trabalhos se deu pelo envolvimento e interesse desses alunos no uso das novas tecnologias disponíveis para o projeto.

Terminal Intermodal para Córdoba

No trabalho do aluno Luis Fernando Milan, o uso da maquete como forma de concepção de projeto e conceituação formal ajudou na percepção dos espaços e dos problemas construtivos do projeto. O processo de construção da maquete pôde revelar erros e desafios no desenvolvimento do projeto, que talvez não fossem percebidos simplesmente em representações bidimensionais ou em imagens, mesmo que tridimensionais, na tela do computador. A figura 6.14 representa a maquete na primeira entrega do trabalho (elaborada sem nenhum recurso de prototipagem digital), ocorrida no primeiro semestre de 2008. Esta etapa foi elaborada na cidade de Córdoba, local de implantação do projeto e onde o aluno participou de um estágio

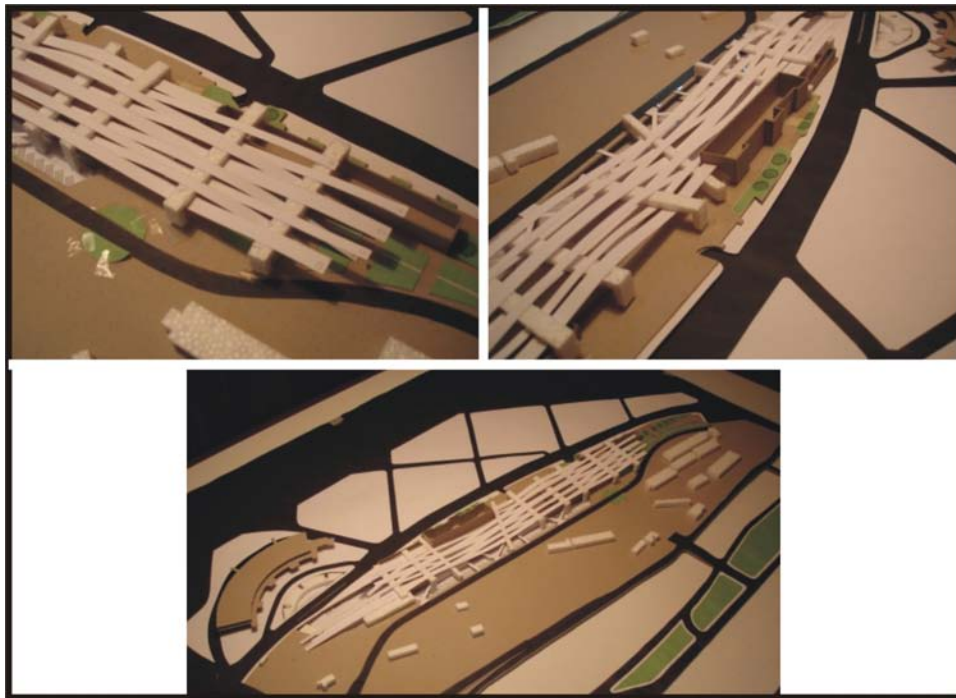


Figura 6.14: Maquete inicial do trabalho de Luis Fernando Milan no primeiro semestre 2008
Fotos: Luis Fernando Milan

A figura 6.15 ilustra a maquete entregue na fase final, ocorrida em dezembro, executada na cortadora a laser. Além das variáveis de projeto que evoluíram desde a primeira entrega do projeto, a qualidade da maquete física mostra um compromisso com a realidade e identifica detalhes e soluções.

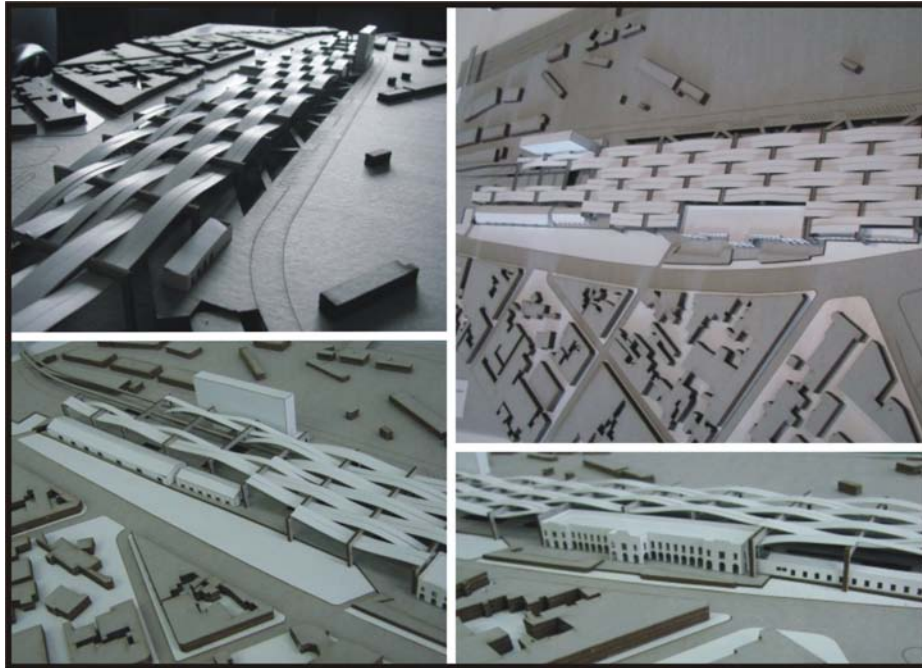


Figura 6.15: Maquete da entrega final do trabalho de Luis Fernando Milan em dezembro 2008
Fotos: Regiane Pupo

Segundo o autor desse projeto, quando perguntado se o resultado projetual teria sido diferente se as maquetes fossem executadas à mão, respondeu “... A precisão da cortadora e a facilidade de manuseio incentivam a inserção de detalhes que fazem toda a diferença na representação e no entendimento do projeto. No meu caso, os pórticos e as fitas da cobertura encaixaram perfeitamente, sem que fosse necessária qualquer adequação. Se fosse feito à mão, com certeza os elementos não teriam se encaixado logo no primeiro corte. Além de ajudar nos detalhes, isso contribui para a redução do tempo gasto na produção da maquete”.

Hotel de Negócios para o Pólo Tecnológico de Campinas

Muitas vezes, a dificuldade em expressar tridimensionalmente pensamentos e idéias, em desenhos feitos à mão ou mesmo por meio de *software* específicos, pode atrapalhar na produção de projetos mais complexos. No caso da aluna Mariana Ramos, a tela do computador, durante seu processo de projeto, é um elemento limitador para a expressão de idéias. A utilização da prototipagem digital, mais especificamente a cortadora a laser, fez despertar na aluna seu processo projetual que, no caso do desenvolvimento da volumetria do projeto do TFG, foi desenhar em 2D para cortar na cortadora a laser e montar a maquete 3D em seguida. Ela afirma que “... somente em desenhar as faces, uma a uma, para o uso da cortadora a laser e montá-las depois, já entendo coisas sobre meu projeto que não teria pensado se estivesse focada só no desenho 3D do computador”. Isso possibilitou um maior entendimento e crítica ao projeto proposto. A figura 6.16 mostra nas imagens a) e b) as primeiras maquetes, responsáveis pelo entendimento tridimensional do projeto e as imagens c) e d) ilustram a maquete final apresentada para a banca de avaliação.

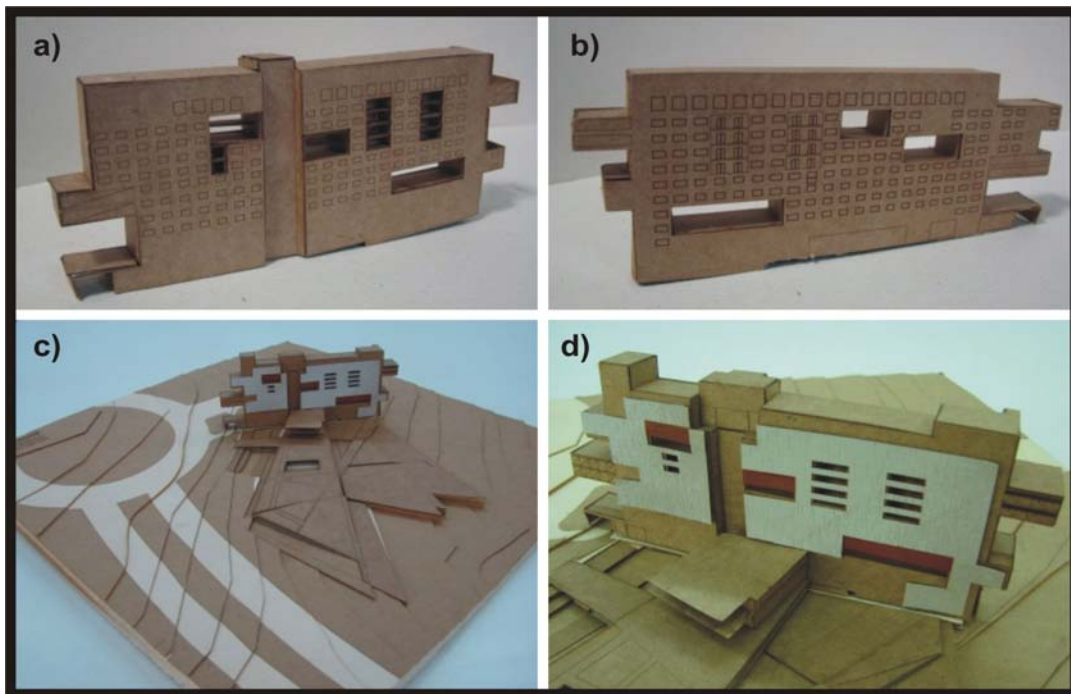


Figura 6.16: Maquetes da entrega inicial (a e b) e final (c e d) do trabalho de Mariana Ramos
Fotos: Regiane Pupo

Caminhos à deriva: novas cartografias em um conjunto habitacional

A topografia muito acentuada do terreno no trabalho da aluna Maria Julia Mazetto, foi a principal preocupação na fase inicial do processo de projeto. O terreno, modelado com curvas de nível produzidas na cortadora a laser, em papelão ondulado, ajudou na observação e intervenção nos diversos desníveis encontrados. A representação dos prédios existentes também foi efetuada em papelão ondulado e a dos prédios propostos em papel cartão. Ambos foram cortados na cortadora a laser, como mostrados na figura 6.17. A presença da maquete foi fundamental para o entendimento do terreno e da proposta: “... a visualização e os estudos de volumetria em uma situação de topografia acentuada, me ajudaram muito na obtenção de soluções com a presença da maquete”, afirma a aluna.

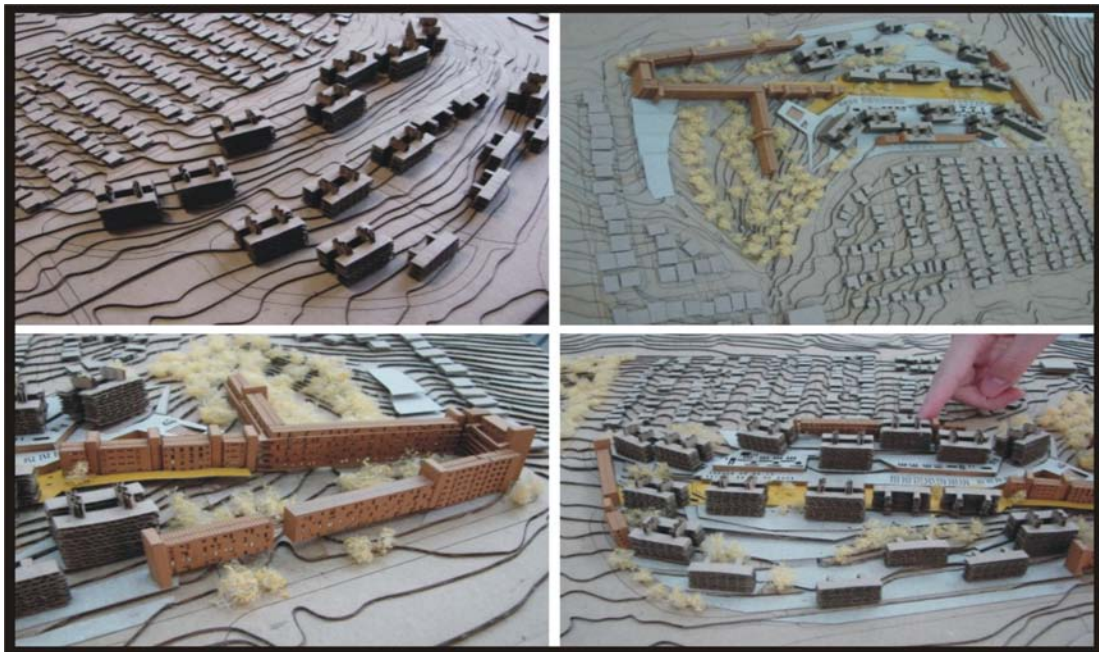


Figura 6.17: Maquete caracterizando acentuada topografia da aluna Maria Julia Mazetto
Fotos: Regiane Pupo

Giramundo Teatro de Bonecos

No projeto da aluna Izabela Maciel, houve a necessidade de se utilizar diversas mídias de produção, além da cortadora a laser durante o processo de projeto. Em uma primeira etapa, a forma inicial do complexo arquitetônico, principal foco da proposta, foi “esculpida” à mão, utilizando poliuretano expandido e digitalizada para a obtenção de um arquivo digital (Figura 6.18). A digitalização se deu no LOPCA, Laboratório de Otimização, Projeto e Controle Avançado, da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP, com o qual o LAPAC tem convênio.



Figura 6.18: Bloco em PU e digitalizado
Fotos: Gabriela Celani

Após a obtenção do arquivo digital em 3D, este foi manipulado e enviado ao *software* Pepakura para a planificação do modelo 3D, com a correta indicação de abas de colagem, de vincos e recorte, visando o posterior corte na cortadora a laser (Figura 6.19). O material usado para o corte dessa peça foi o papel Couche, em alta gramatura, de fácil corte na cortadora a laser. O terreno e as edificações do entorno onde se deu a intervenção foram executados na cortadora a laser, em papelão roller. A figura 6.20 mostra as imagens da maquete final de apresentação do trabalho.

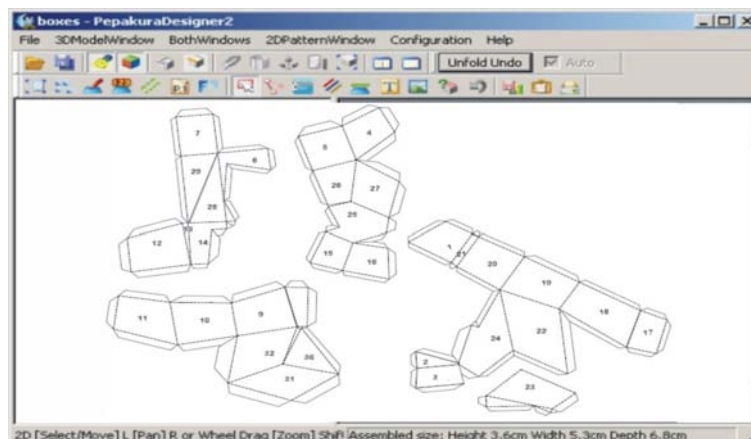


Figura 6.19: Planificação no software Pepakura

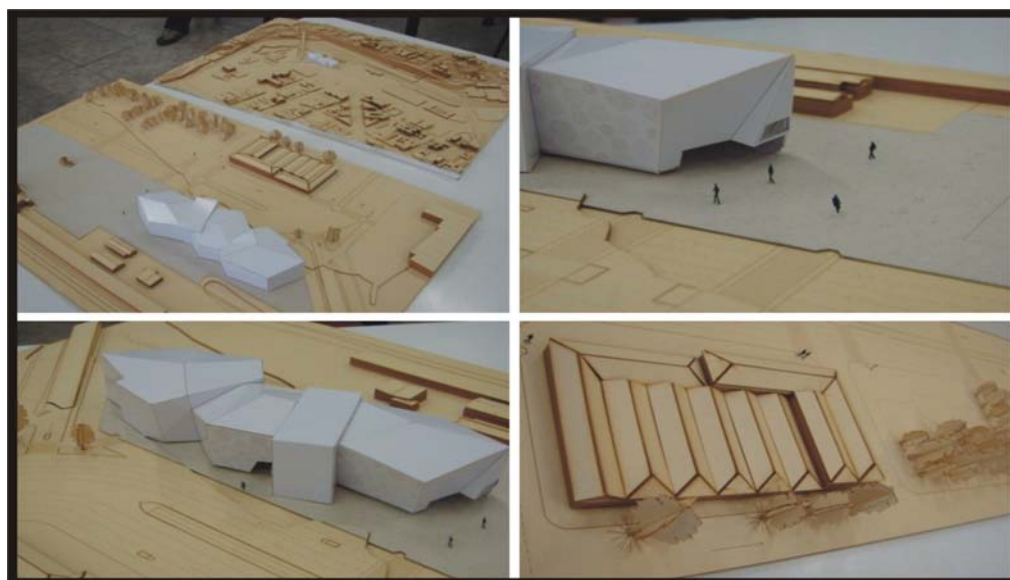


Figura 6.20: Maquete de apresentação final de Izabela Maciel
Fotos: Regiane Pupo

Como visto, os quatro trabalhos de TFG acompanhados durante o processo de elaboração e produção tiveram enfoques e necessidades diferenciados quanto ao uso da prototipagem digital. Fatores como entendimento do projeto, transição 2D-3D-2D, estudos topográficos e o uso de diferentes mídias para a concepção projetual foram citados. A utilização de diferentes tecnologias, em diferentes momentos do processo de projeto caracteriza a importância que técnicas como a de prototipagem digital têm na formação do arquiteto. Sem dúvida, a qualidade dos projetos, bem como suas

representações tridimensionais físicas, foram beneficiadas neste ano de 2008 com a utilização da prototipagem digital pelos alunos do TFG da FEC. O processo é irreversível; a tendência é que mais alunos e professores se envolvam cada vez mais com as tecnologias disponíveis, proporcionando uma qualidade de ensino a ser refletida na vida profissional de cada um.

6.3. Análise e interpretação dos dados

Os instrumentos metodológicos utilizados para a análise e interpretação dos dados foram questionários aplicados ao final de cada experimento, *workshop* ou acompanhamento dos trabalhos de TFG. É importante salientar que a aplicação dos questionários foi efetuada após a transferência de tecnologia e impressão das maquetes. A análise e interpretação dos dados referentes ao acompanhamento dos trabalhos de final de graduação já foram apresentados e discutidos no item anterior (6.2) enquanto os trabalhos eram relatados. O questionário aplicado aos alunos do TFG, com respostas discursivas, pode ser consultado no apêndice VII, em que os alunos dos quatro trabalhos escolhidos para a análise discursam suas idéias e experiências a respeito da utilização das novas técnicas de prototipagem digital no processo de projeto.

Dos nove *workshops* que o LAPAC ofereceu de 2007 e 2008, oito deles foram ministrados por esta pesquisadora em conjunto com a orientadora. Ao final de cada *workshop* um questionário foi aplicado aos participantes (Apêndice VIII), que incluíram cinco professores (9%), treze alunos da pós-graduação (24%) e 36 alunos da graduação (67%). A ordem das questões tem uma lógica seqüencial, pois se inicia com uma abrangência mais genérica sobre o conhecimento da prototipagem digital para arquitetura, passando pelas especificidades das técnicas apresentadas e, ao final, estreitando para as informações específicas de ensino de projeto. Os resultados obtidos

com essa enquete foram agrupados em quatro tópicos, apresentados e discutidos a seguir:

Sobre a Prototipagem digital

Depois de uma atualização teórica e prática, era necessário, primeiramente, traçar um *background* desse usuário em potencial e avaliar a confiança que os participantes tinham, a partir de agora, na tecnologia introduzida. Isso foi consequência de uma abordagem nova, com uma tecnologia até então distante dos padrões brasileiros. O gráfico 6.1 identifica o conhecimento que o participante do *workshop* possuía antes da transferência de tecnologia. Pode-se notar que a tecnologia de prototipagem digital já era conhecida da maioria (66%), mas ainda sem uso efetivo.

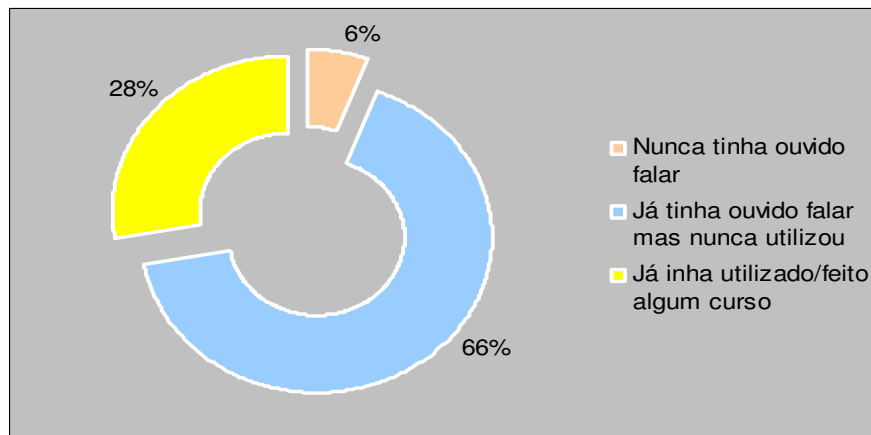


Gráfico 6.1: Conhecimento prévio de PR e FD

Quando perguntados se acreditavam na utilização da prototipagem e fabricação digitais para a produção de maquetes, como apoio ao processo de projeto em arquitetura, os participantes se mostraram entusiasmados, confiantes e seguros de que haviam acabado de descobrir uma tecnologia, agora ao seu alcance, que podia fazer parte das várias atividades em que o arquiteto profissionalmente é envolvido (Gráfico 6.2).

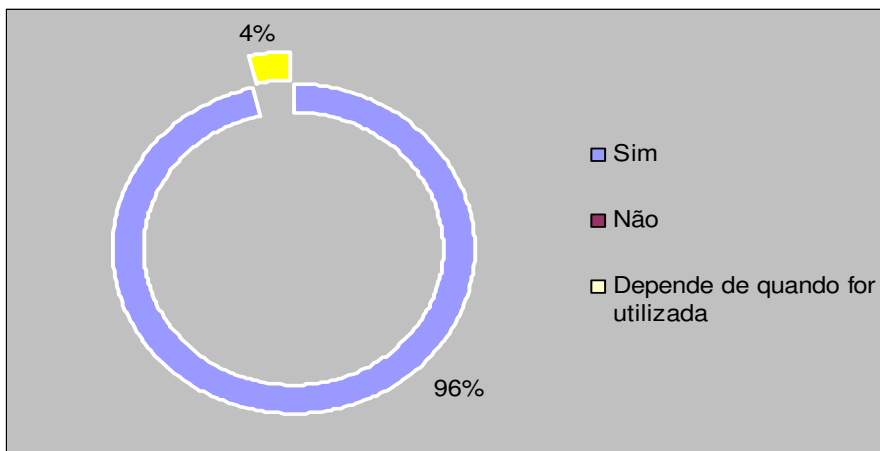


Gráfico 6.2: Acredita na utilização da prototipagem e fabricação digitais para a produção de maquetes, como apoio ao processo de projeto em arquitetura?

Em relação às fases do processo de projeto em que a prototipagem é mais indicada, a opinião dos participantes dos *workshops* mostrou um equilíbrio homogêneo entre as diversas etapas do processo de projeto. Como observado no gráfico 6.3, a introdução da prototipagem digital deve se dar ao longo de todo o processo, desde os estudos de viabilidade até a apresentação do projeto. Nesta questão, o entrevistado poderia escolher quantas opções desejasse.

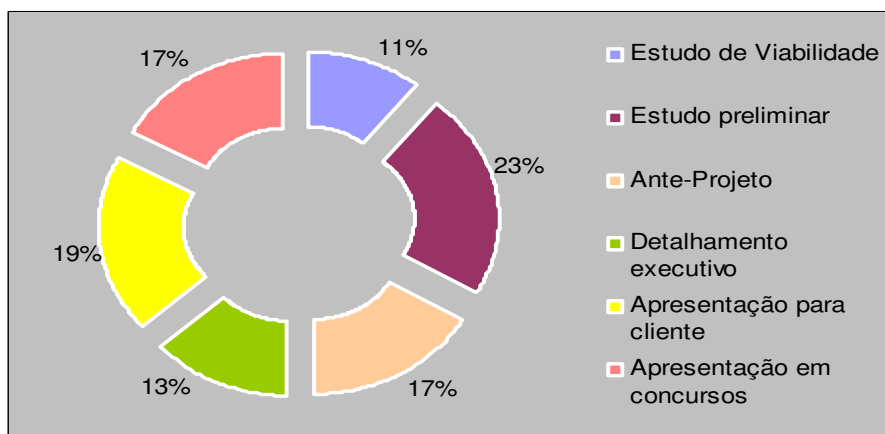


Gráfico 6.3: Fases do processo de projeto que a prototipagem é mais indicada

As limitações apontadas pelos participantes dos *workshops* quanto às duas tecnologias utilizadas (3DP e corte a laser) demonstraram, por exemplo, que no uso da

cortadora a laser (Gráfico 6.4) se prendem à montagem das peças cortadas (34%). Embora esta possa ser considerada como uma etapa de pós-processamento, ainda necessita de um planejamento prévio com o objetivo de evitar perdas de tempo e de material. A limitação de uso de certos materiais (17%) se dá pelo dano que os componentes eletrônicos da máquina podem sofrer por emissão de fumaça e gases tóxicos. O custo, nesse caso, não foi considerado um fator limitante de uso, pois não necessita de material específico para o uso.

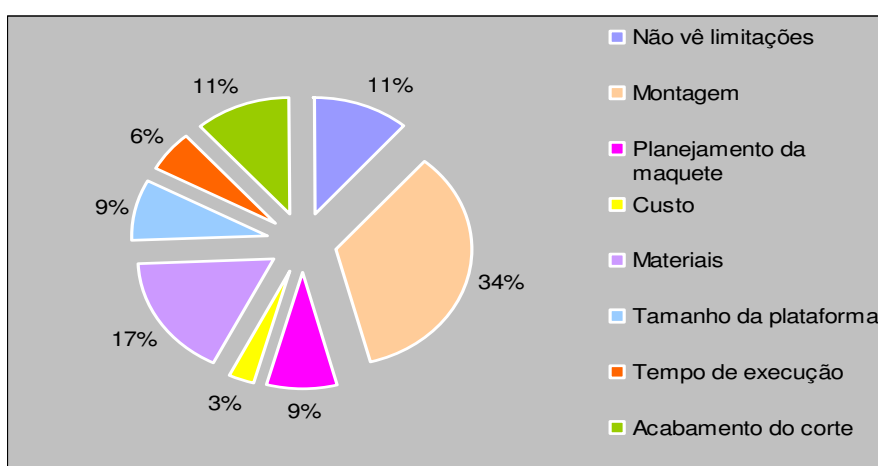


Gráfico 6.4: Principais limitações na utilização da tecnologia de corte a laser

No uso da tecnologia 3DP (Gráfico 6.5), a principal limitação apontada pelos participantes foi em relação ao custo de material de consumo (41%) que depende de importações e não têm similares no Brasil. A fragilidade das peças (23%) e o tamanho dos objetos produzidos por estas máquinas (16%) foram outros dois fatores que intensificaram as limitações desse equipamento.

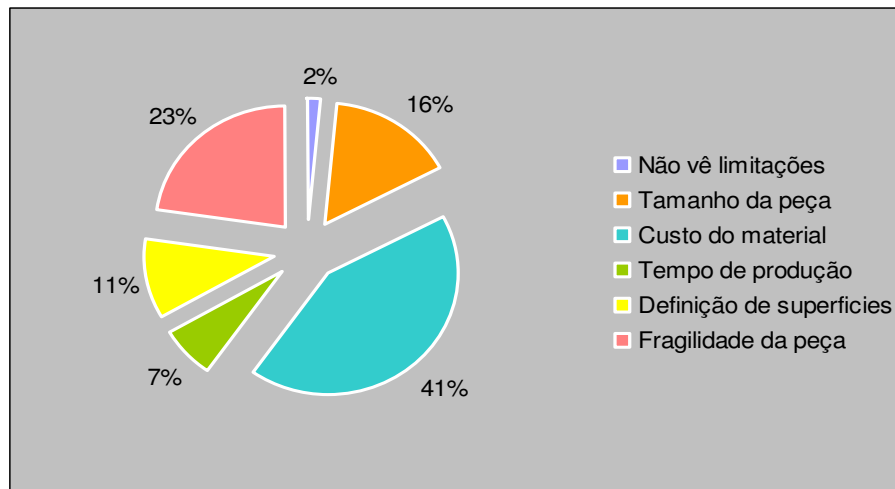


Gráfico 6.5: Principais limitações na utilização da tecnologia 3DP

O Apêndice IX contém todas as respostas, discursivas, obtidas para esta questão do questionário, com as quais se pode tirar algumas conclusões para cada tecnologia.

Sobre as técnicas utilizadas

Ainda com a intenção de informação generalizada e não específica ao ensino foi importante identificar, na opinião dos participantes, qual das duas técnicas apresentadas seria a mais indicada para a arquitetura. O gráfico 6.6 mostra que houve uma empatia muito grande por parte dos participantes com as duas técnicas apresentadas, por isso a maioria (55%) ter escolhido as duas como indicadas para a arquitetura. Entretanto, a cortadora a laser permanece em vantagem devido, principalmente, a fatores econômicos e não operacionais.

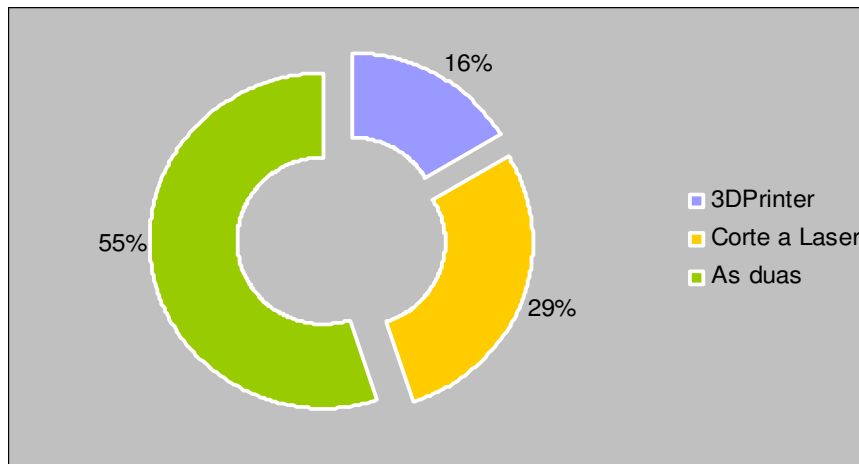


Gráfico 6.6: Qual das duas técnicas disponíveis no LAPAC é a mais indicada para arquitetura?

As fases do processo de projeto em que cada técnica se encaixa foram apontadas e estão identificadas no gráfico 6.7. A cortadora a laser foi a técnica escolhida como a mais apropriada para a fase de estudo preliminar do processo de projeto. No outro extremo do processo, na apresentação final, aparece a impressão 3D como a mais indicada, embora não muito distante da cortadora a laser. É muito provável que estas respostas estejam ligadas às fases de projeto que os alunos se encontravam quando responderam a este questionário. São visíveis, e totalmente coerentes, as proporções de utilização de cada técnica para cada etapa do processo.

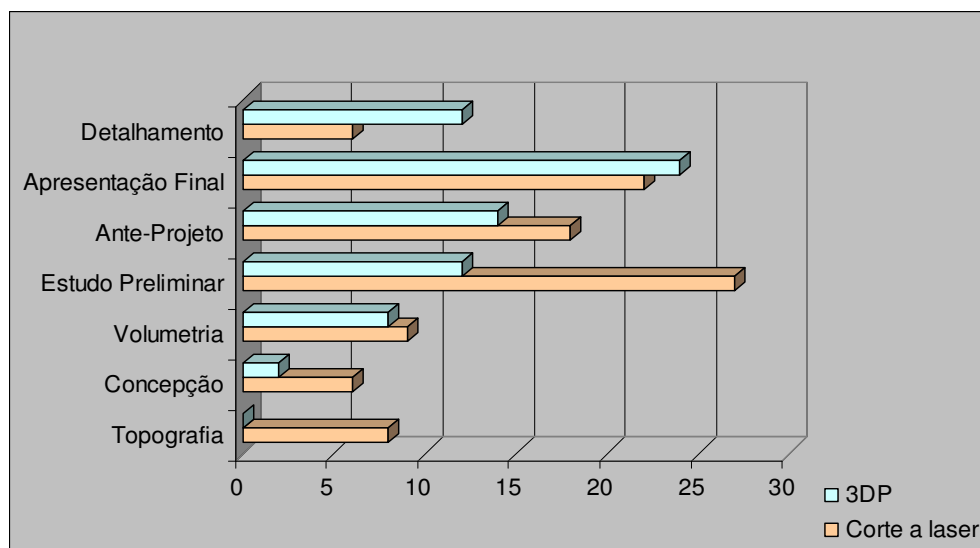


Gráfico 6.7: Em que fases do processo de projeto você acha que as duas técnicas são mais apropriadas?

Sobre a prototipagem digital no ensino de projeto

Depois de discutidas a utilização da prototipagem digital em arquitetura, em geral e durante o processo de projeto, o que mais interessa para o escopo desta tese é sua inserção no ensino. O modelo físico estabelece uma relação muito intensa entre o objeto e o arquiteto e não pode ser substituído por nenhum outro meio. As quatro últimas questões dizem respeito à importância da prototipagem digital no ensino e de que forma ela poderia fazer parte da disciplina de projeto, inserida na grade curricular dos cursos de arquitetura. O gráfico 6.8 ilustra a total aceitação por parte dos participantes das novas técnicas de produção de modelos tridimensionais para o ensino de arquitetura, em sua forma mais generalizada de abordagem.

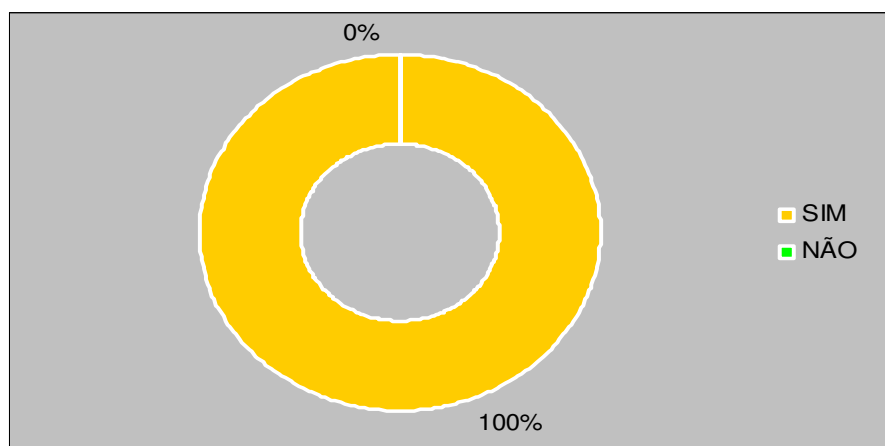


Gráfico 6.8: Você acredita que a prototipagem digital pode ser um fator importante no ensino de projeto em cursos de arquitetura?

Depois de esclarecida a importância das tecnologias de prototipagem digital no ensino de projeto, é importante salientar em que fase(s) da grade curricular estas tecnologias seriam mais adequadas para serem inseridas. As respostas à esta questão descreveram justificativas como “... a prototipagem rápida é uma forma de análise de tamanho e proporções, “... a prototipagem rápida é uma ferramenta que amplia horizontes” ou ainda “... a prototipagem rápida auxilia o aluno a pensar em 3D”. Estas afirmações fizeram com que a fase inicial do currículo de arquitetura tivesse 57% da preferência para a inserção das novas tecnologias de prototipagem digital, como

demonstrado no gráfico 6.9. Por outro lado, os 34% que sugerem a inserção dessas tecnologias no meio do curso, justificaram muito claramente o medo da dependência de uma tecnologia e a importância das técnicas “tradicionais” de confecção de maquetes, após a introdução de meios expressivos mais comuns, nos quais se incluem *software* 2D e 3D. Já os que elegeram a fase final do curso como ideal para o uso dessas tecnologias afirmam que ainda há a necessidade de amadurecimento para entender a lógica do processo de modelagem e planificação.

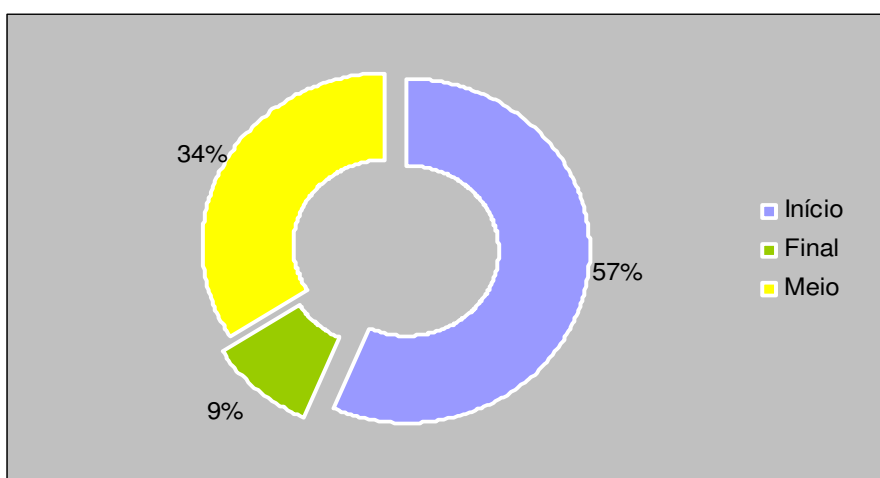


Gráfico 6.9: Em que fase do currículo de arquitetura a prototipagem digital deveria ser inserida?

Abrindo o leque de possibilidades que as técnicas de prototipagem digital podem abranger dentro de um currículo de arquitetura, a próxima questão avaliou em quais disciplinas do currículo de arquitetura a prototipagem digital poderia ser útil. As opções de respostas não foram impostas pela entrevistadora e sim sugeridas pelos próprios participantes. Como demonstrado no gráfico 6.10 a disciplina de projeto recebeu 37% das sugestões oferecidas, seguida da disciplina de maquetes e modelos, com 14%. A diversidade de disciplinas abordadas mostra o interesse dos alunos em inserir a nova tecnologia em áreas até hoje pouco exploradas.

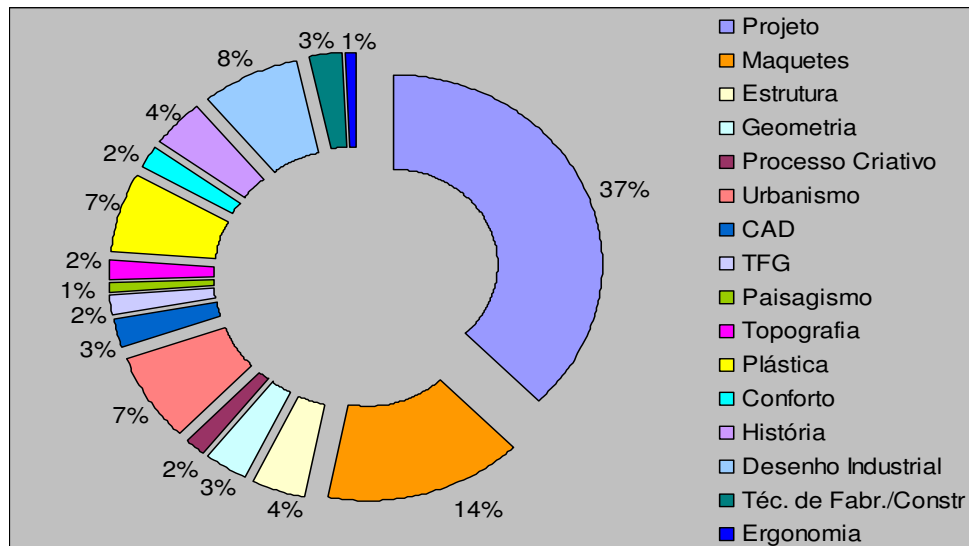


Gráfico 6.10: Em que disciplinas do currículo de arquitetura a prototipagem digital poderia ser útil?

Estreitando a pesquisa para a área que se deseja explorar, a disciplina de projeto e, coincidentemente a mais escolhida pelos alunos, a preferência de uso da nova tecnologia nesta disciplina ficou dividida entre o seu início e final. Como demonstrado no gráfico 6.11, as etapas de estudo preliminar e apresentação final foram as mais identificadas (31% cada uma). Apesar de a prototipagem digital estar ligada diretamente à representação tridimensional de qualquer estudo, a fase de volumetria da disciplina ficou somente com 8% das etapas propostas. Isso demonstra que a prototipagem digital foi vista por muitos alunos como uma maneira de produzir maquetes finais, bem acabadas, voltadas para a apresentação.

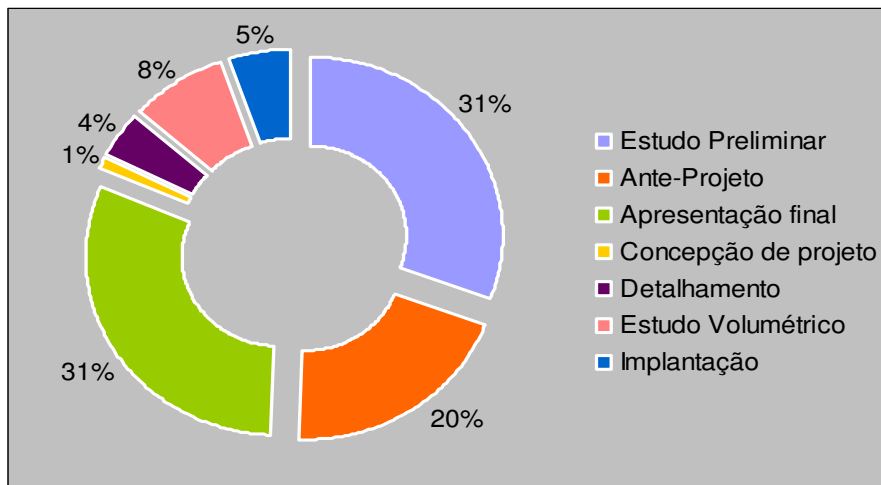


Gráfico 6.11: Em que etapas do desenvolvimento de uma disciplina de projeto os alunos deveriam utilizar as técnicas de prototipagem digital?

7. Proposta

“Education of designers requires some modification to better qualify them for working within such [CAD/CAM] processes”.
(André Chaszar)

Desde que o computador começou a fazer parte da rotina de arquitetos, existe certo receio pela idéia de que as máquinas poderiam substituir suas funções ou mesmo seus *insights* de criatividade, principalmente durante a inserção da disciplina de informática aplicada, em cursos de arquitetura, quando utilizada nas disciplinas de projeto. Felizmente, as experiências dos últimos anos têm contribuído para a troca de dados entre os meios de representação e de produção em arquitetura e construção permitindo que a era digital tivesse um avanço substancial.

Se o profissional da área de arquitetura conhecer a real capacidade de produção com *software*, aplicativos e equipamentos de fabricação digital poderá projetar tendo em vista a possibilidade de utilização de métodos de produção digital de maquetes e de componentes do edifício. A consequência dessa troca de informação é o envolvimento dos arquitetos nos processos de fabricação (Kolarevic, 2003) favorecendo novas oportunidades de projeto, de soluções e de fabricação de maquetes e elementos construtivos. Mitchell (1994 apud Kolaveric, 2003, p. 32) observa que nos tempos sem tecnologia apropriada, “os arquitetos desenhavam o que podiam construir e construían o que podiam desenhar”. Hoje, com a utilização das novas tecnologias, pode-se afirmar que os arquitetos modelam o que desejam e constroem.

No aprendizado de arquitetura, essa prática é essencial. Além da importância dos equipamentos e *software* envolvidos na inserção de novas técnicas, a maneira como os futuros arquitetos são treinados para a vida profissional, que hoje prima pela tecnologia, é fundamental. A capacidade de transitar diretamente da modelagem

tridimensional para sua impressão, também tridimensional, desafia a necessidade da representação tradicional, como plantas e cortes. A utilização contínua de novos procedimentos durante todo o processo de projeto é introduzida em um processo designado *Digital Chain* (corrente digital) o qual "reúne um processo digital contínuo de organização, desde o conceito até sua produção" (Dohmen, 2007, p. 801). Infelizmente no Brasil, ainda, o "*digital chain*" é compreendido como uma forma rara de se produzir arquitetura, dentre tantas possíveis. Entretanto, seu potencial tem capacidade para criar qualquer forma não-regular imaginável com o auxílio dos modernos sistemas CAD somados aos equipamentos de prototipagem e fabricação digitais. Para realmente estabelecer a ponte entre projeto e fabricação é necessário adquirir conhecimento sobre os métodos e ferramentas envolvidos na construção, tornando o processo mais transparente, aumentando a própria qualidade do projeto.

Kinger (2001) explica que os novos procedimentos emergem da necessidade de direcionar o projeto direto para a produção com cortes, dobras e espessuras para a obtenção de formas físicas precisas. Além disso, as novas práticas também permitem prever novas possibilidades, pela facilidade de obtenção de protótipos em escala 1:1 ou maquetes reduzidas para avaliações, raramente utilizadas nos métodos tradicionais. Estas múltiplas e novas interações são necessárias para o total envolvimento ao longo do processo de projeto e que hoje estão conduzindo a mudanças substanciais nas grades curriculares dos cursos de arquitetura. São considerações ainda em início de discussão, mas de relevante importância se consideradas todas as complexidades, desde o início do processo de projeto até sua produção, em um momento em que a informação digital permite prever, avaliar, simular, fabricar e montar arquitetura.

Baseando-se nesses conceitos, esta pesquisa sugere duas propostas para cursos de arquitetura no Brasil: (1) a inserção de técnicas de prototipagem e fabricação digitais na grade curricular e (2) a criação de diretrizes para implementação e operacionalização de laboratórios de prototipagem e fabricação digitais. Ambas são baseadas em experiências adquiridas no LAPAC e em outros laboratórios de

prototipagem e fabricação digitais e podem contribuir para que outros cursos de arquitetura se beneficiem das novas tecnologias disponíveis, evitando erros ou facilitando a operacionalização na organização básica necessária.

7.1. Inserção de prototipagem e fabricação digitais em cursos de arquitetura

De acordo com o artigo 9º da Proposta de diretrizes curriculares nacionais para o ensino de graduação em arquitetura e urbanismo, emitido pela Secretaria de Educação Superior do Ministério da Cultura, o desenvolvimento do ensino para a educação de arquitetos e urbanistas exige, dentre outros equipamentos e instalações, laboratórios de tecnologia da construção e de informática e oficina de maquetes ou laboratório de modelos. Com base nessas recomendações e face às novas tendências de utilização de diversas tecnologias no ensino, os cursos de arquitetura necessitam de uma reorganização da grade curricular, de forma a integrar tecnologia, projeto e construção. A inserção da informática aplicada no ensino de arquitetura deve seguir as tendências e transformações ocorridas com o desenvolvimento de novas tecnologias, de forma a posicionar o aluno, através da pesquisa e prática, no cenário mundial. Hoje, tecnologias como a prototipagem e a fabricação digitais podem preencher esses requisitos.

Para que o arquiteto assuma o controle de seus projetos, com o auxílio de *software* especializado e equipamentos de fabricação digital, um conhecimento abrangente deve ser incorporado à sua prática profissional. Para isso, as escolas de arquitetura devem proporcionar ao aluno uma base sólida em várias disciplinas específicas, além de implantar a “corrente digital” (*digital chain*) ao longo da grade curricular, representada pela integração das novas tecnologias às disciplinas existentes. A permeabilidade de tecnologias como a prototipagem e fabricação digitais às

disciplinas tradicionais, distribuídas ao longo da grade curricular, promove um envolvimento mais consolidado e estabelece uma motivação por parte de alunos e professores. Os resultados obtidos com as experiências testadas durante esta pesquisa demonstram esse entusiasmo.

A inserção de tecnologias como prototipagem e fabricação digitais em cursos de arquitetura no Brasil deve respeitar especificações curriculares, operacionais e culturais. Dentre as questões curriculares, devem ser discutidos e analisados fatores como o (1) posicionamento dessas tecnologias dentro da grade curricular básica, (2) a interdisciplinaridade necessária com as demais disciplinas já existentes e (3) o envolvimento direto da disciplina de projeto no processo de informatização. As questões operacionais envolvem: (1) a obtenção de equipamentos apropriados para a utilização das novas técnicas, por meio de convênios, financiamentos ou recursos que possam equipar de forma coerente os requisitos básicos necessários, (2) a imediata formação e conscientização de professores envolvidos nas disciplinas dos cursos de graduação, principalmente as de projeto, além de treinamento de alunos, com o oferecimento de cursos rápidos e *workshops* sobre as novas técnicas e (3) a presença de pessoal treinado para dar suporte e manutenção. Por final, como questões culturais, cabe o devido esclarecimento das tecnologias disponíveis, acessíveis e melhor direcionadas à arquitetura, visando a aceitação de alunos e professores, elucidando experiências já testadas e comprovadas em outros países e culturas.

Quando Mitchell e McCullough (1994) definiram a estrutura que resume as relações entre as técnicas digitais e as tradicionais para a arquitetura, relatada no item 2.1 desta tese, as ligações intrínsecas aos modelos digitais não foram especificadas. Visando um procedimento de inserção na grade curricular dos cursos de arquitetura coerente e integrado às disciplinas existentes, é importante estabelecer as diversas possibilidades inerentes aos modelos digitais visando a utilização de técnicas de prototipagem e fabricação digitais. A figura 7.1 exemplifica essas possibilidades de *input* e *output* em torno do modelo geométrico digital.

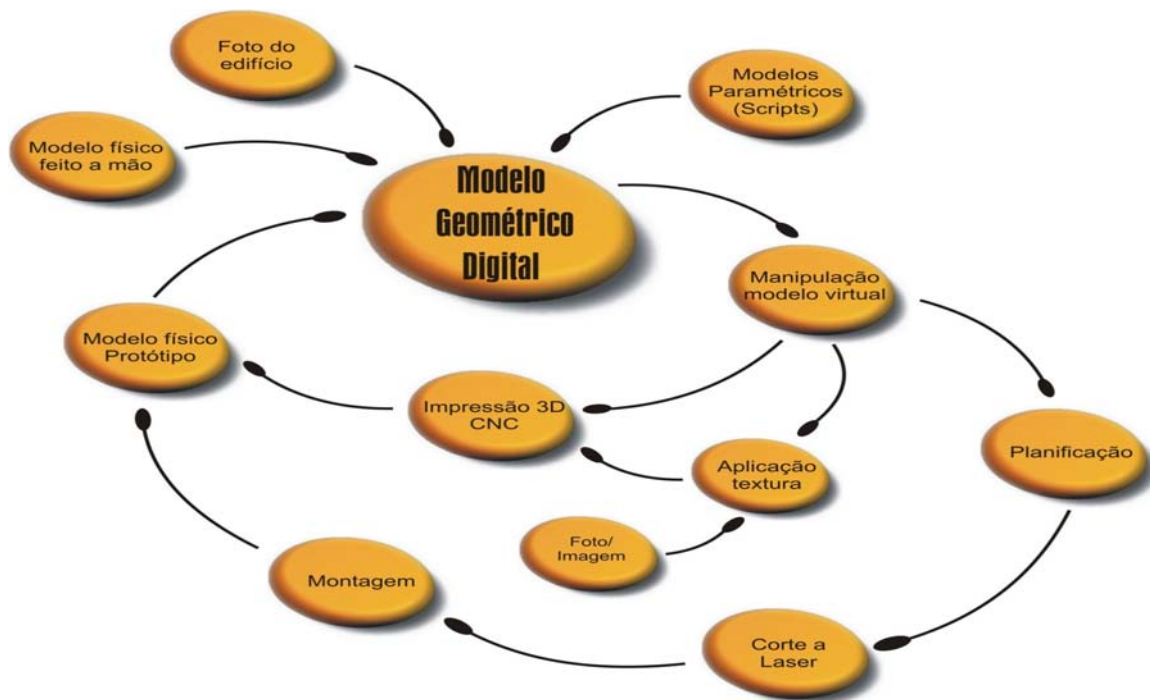


Figura 7.1: Ligações intrínsecas ao modelo geométrico digital
Adaptação de Mitchell & McCullough (1994) por Regiane Pupo

Como visto, pode-se considerar que existem quatro maneiras de se obter modelos digitais 3D, excluindo-se aquelas executadas diretamente em sistemas CAD específicos: (1) a primeira delas é por métodos paramétricos em que *scripts* são executados por programação em diversas linguagens e podem ser manipuladas em sistemas CAD tradicionais; (2) por meio de digitalização, fotos ou desenhos de edifícios podem ser transformados em modelos digitais por meio de uso de programas específicos, como é o caso do *PhotoModeller* e (3) ainda na digitalização, as maquetes modeladas ou executadas a mão (ou mesmo as que já foram prototipadas) podem ser digitalizadas tridimensionalmente para a obtenção de modelos geométricos digitais. Ambas as formas de digitalização citadas estão descritas no item 2.1.1. desta pesquisa. Após as digitalizações, sua edição e manipulação são perfeitamente viáveis em sistemas CAD tradicionais.

Uma vez com o modelo 3D digitalmente manipulado de acordo com a saída de impressão escolhida, os modelos físicos podem ser obtidos (1) pela planificação, seguida de corte a laser e montagem manual ou (2) pela impressão 3D ou em escultura por equipamento CNC. Na impressão 3D, no sistema aditivo em gesso, por exemplo, existe a possibilidade de impressões coloridas ou a aplicação de imagens nos modelos físicos (Figura 7.2). A utilização de equipamento CNC irá produzir um protótipo por meio de desgaste de material, como já mencionado anteriormente nessa pesquisa.



Figura 7.2: Aplicação de textura/imagem em impressões em 3DP
Fonte: www.zcorp.com

Com isso, esta sugestão de adaptação na estrutura sugerida por Mitchell e McCollough (1994) elucida as opções em torno dos modelos digitais, já tão utilizados e explorados por alunos. Seu objetivo principal é o de interar todas as possíveis alternativas de uso das novas tecnologias com as demais disciplinas já tradicionais dos currículos dos cursos de arquitetura no Brasil. Para isso, há a necessidade de estabelecer quais destas disciplinas se inserem a cada tecnologia apresentada. A figura 7.3 sugere o envolvimento das principais disciplinas de um currículo de um curso de arquitetura, com as tecnologias de prototipagem e fabricação digitais, partindo da obtenção do modelo digital 3D até a sua impressão física. À primeira vista, parece impossível introduzir tais técnicas, ou disciplinas, ou tecnologias, em currículos já muito carregados. Mas é importante ressaltar que esta proposta sugere que as tecnologias de prototipagem e fabricação digitais se insiram como apoio às disciplinas já existentes, possibilitando novas alternativas na automatização do processo, agregando valor e

qualidade ao projeto e conseqüentemente ao ensino. Além disso, é muito importante que as disciplinas de projeto, presentes ao longo de todo o currículo, tenham uma participação ativa e intensa quanto ao uso das tecnologias, concomitantemente às demais da grade.

POSSÍVEIS APLICAÇÕES NAS DISCIPLINAS DE UM CURSO DE ARQUITETURA E URBANISMO

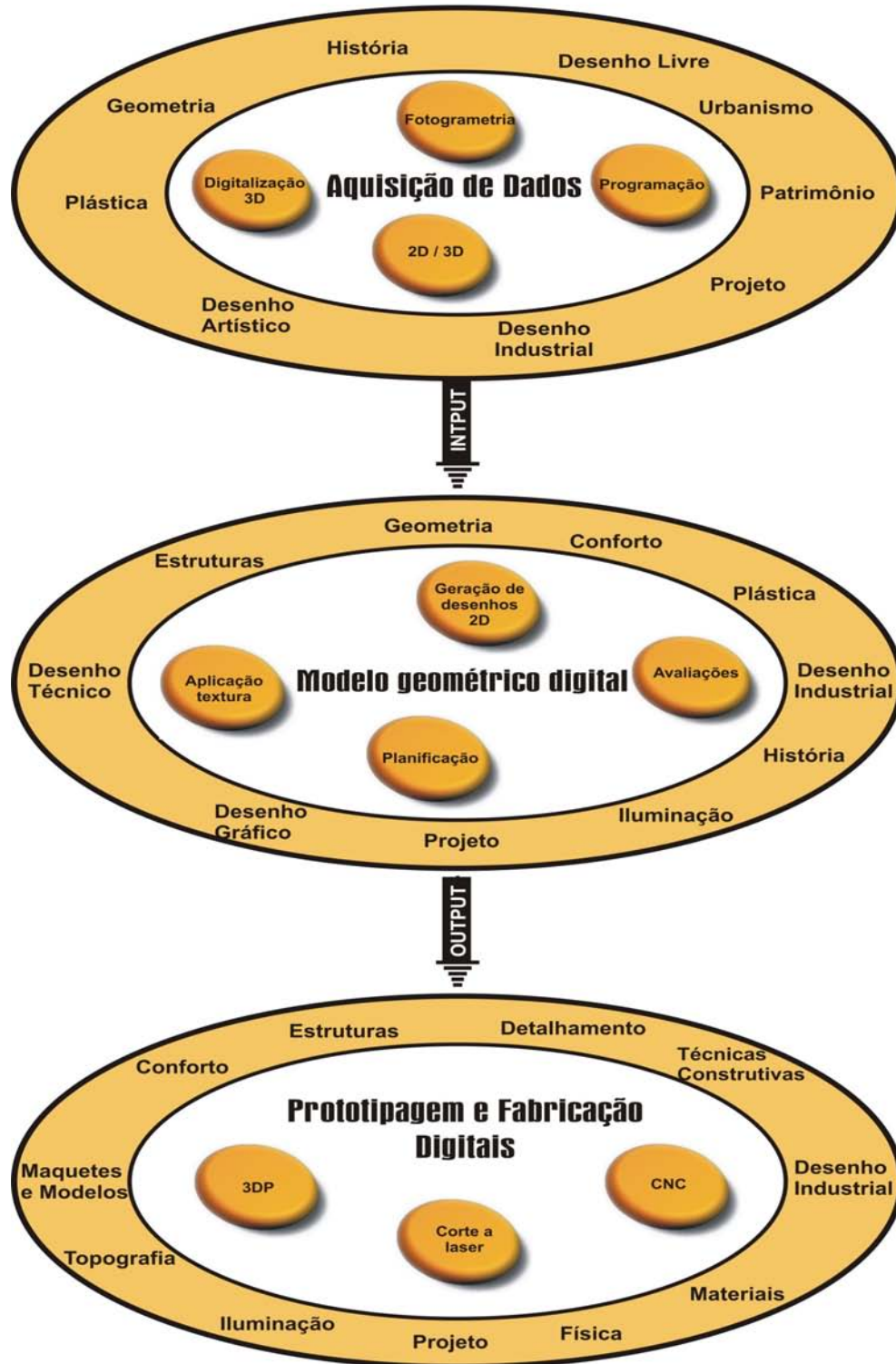


Figura 7.3: Proposta de inserção das novas tecnologias na grade curricular de arquitetura

Após o conhecimento das técnicas, das possibilidades de uso e dos recursos disponíveis para a obtenção de modelos físicos, pode-se notar que cada disciplina do currículo básico de cursos de arquitetura é envolvida, de alguma forma, com as tecnologias citadas. São vastas as possibilidades como cada disciplina pode se envolver com tecnologias de prototipagem e fabricação digitais. O que vai garantir o sucesso e o aproveitamento absoluto dessa integração, sem dúvida, é a informação e conscientização do corpo docente em estimular esta prática. As experiências demonstram que a cada nova geração de alunos, é maior o entusiasmo e a facilidade de absorção de novas tecnologias.

Finalizando, os sistemas generativos como *shape grammars*, algoritmos genéticos ou mesmo a recente tecnologia BIM, embora não incluídos como sugestão, são perfeitamente adaptáveis à integração com as tecnologias de prototipagem e fabricação digitais como apoio ao ensino de arquitetura. No Brasil, infelizmente, ainda muito pouco tem sido feito para o desenvolvimento de metodologias para a utilização dessas tecnologias no ensino de arquitetura.

7.2. Diretrizes para implementação e operacionalização de um laboratório de prototipagem e fabricação digitais em um curso de Arquitetura

A implementação e operacionalização de um laboratório de prototipagem e fabricação digitais em um curso de arquitetura devem agregar fatores não somente relativos ao uso da tecnologia isolada, mas também à integração com as demais disciplinas da grade curricular, especialmente as de projeto. Para isso, os objetivos principais devem incluir (1) o desenvolvimento de novas soluções para o processo de projeto; (2) a discussão da importância do uso de maquetes para a melhor compreensão projetual; (3) o estímulo à pesquisa em tecnologia da informação aplicada

à arquitetura; (4) a expansão da interdisciplinaridade dentro da grade curricular do curso de arquitetura; (5) a construção de um ambiente de pesquisa e colaboração entre laboratórios de diversas instituições de ensino; (6) o oferecimento de serviços de extensão à comunidade profissional, incluindo consultorias e treinamentos e (7) a utilização de novas técnicas de fabricação digital na produção de elementos construtivos.

Tendo em vista a experiência de implantação do LAPAC, seguem abaixo cinco itens que devem servir de fundamento para que laboratórios de prototipagem e fabricação digitais possam ser implementados especificamente em cursos de arquitetura.

7.2.1. Escolha dos equipamentos

Operacionalmente, a escolha dos equipamentos é uma decisão que remete diretamente ao tipo de enfoque que se quer dar ao laboratório, ou seja, de execução de maquetes em escala reduzida ou de elementos construtivos em escala real, ou ambos. O primeiro caso reúne equipamentos de tecnologias de corte a laser, aditivas, utilizando a sobreposição de camadas, fresas menores (*milling*) e corte de vinil. Como já descrito nesta pesquisa, existem hoje diversas técnicas de prototipagem digital que utilizam diferentes tipos de matéria-prima as quais vão desde pós de gesso e polímeros (plásticos) até metais. De investimento muito alto, muitas delas não são indicadas para a utilização em meios acadêmicos, frente à dificuldade na aquisição de suprimentos. As impressoras 3D, baseadas em pó de gesso e as cortadoras a laser são bastante adequadas como equipamentos iniciais na implantação de um laboratório em um curso de arquitetura, por serem de custo relativamente baixo (em relação às demais) e de fácil manuseio nas operações direcionadas à confecção de maquetes.

Mas, se a intenção do laboratório visa a fabricação de elementos construtivos em escala 1:1, as fresadoras de grande formato (CNC) são as indicadas. Estas máquinas de controle numérico, que utilizam as técnicas subtrativas, esculpindo madeiras, poliuretano, entre outros materiais, podem servir para a produção de moldes ou elementos construtivos finais. É importante sempre levar em consideração os custos de investimento e despesas operacionais (manutenção, suprimentos e mão de obra especializada) que a implantação de laboratórios com as tecnologias de prototipagem e fabricação digitais demanda. Os equipamentos ainda são caros e a aquisição de seus suprimentos não é tão facilitada para países em que o acesso às tecnologias de ponta ainda depende de taxas de importação e burocracia exagerada.

7.2.2. Aquisição de suprimentos e manutenção de equipamentos

Máquinas sem suprimentos não funcionam, por isso este item deve ser sempre lembrado e material de reserva para eventuais emergências é de fundamental importância. O custo do material de consumo deve ser levado em conta no momento da aquisição dos equipamentos. O pó e o líquido aglutinante (*binder*) que a máquina que o LAPAC possui, por exemplo, a 3DPrinter-310 da ZCorp, são fabricados nos Estados Unidos e têm grande dificuldade de importação para países como o Brasil, mesmo com as facilidades que o governo oferece para importações para fins de pesquisa. Geralmente a compra via representante da empresa fora dos Estados Unidos é sempre muito mais onerosa que a compra direta. Já as cortadoras a laser, por permitirem a utilização de diversos materiais para corte, podem ser mais versáteis e úteis em um primeiro momento. Suprimentos para este tipo de equipamento são esporádicos, desde que se tenha uma manutenção periódica.

A manutenção dos equipamentos é outro fator que deve ter muita atenção. Geralmente, os equipamentos de prototipagem digital têm circuitos e peças muito

pequenos e de alta precisão que necessitam de uma atenção periódica e regular devido a entupimentos, desgastes, falta de lubrificação e pequenos fatores que podem até inutilizar o equipamento. As cortadoras a laser, por exemplo, necessitam de constante manutenção como a limpeza dos espelhos e lentes utilizados na emissão do feixe de laser, pois, se não limpos periodicamente, podem danificar-se com a própria fumaça emitida durante o corte do material utilizado. Para minimizar tais desgastes e a provável combustão de alguns materiais, é recomendado que dois sistemas de exaustão sejam instalados e utilizados juntamente com a cortadora. Um deles, que utiliza um sistema de exaustão similar aos de cozinha, suga a fumaça emitida no momento do corte e a dissipa para fora do ambiente, evitando ainda danos à saúde dos operadores, visto que a fumaça que alguns materiais emanam podem ser altamente tóxicas. É recomendado o uso de máscaras que protejam o usuário de inalar os gases de alguns materiais. O segundo sistema de exaustão é executado por um compressor ligado diretamente ao bocal onde o feixe de laser encosta no material, evitando a possível combustão.

A experiência do LAPAC mostra que se o laboratório não possui verba suficiente para aquisição de material de consumo e um programa de manutenção periódica, então é indicado a aquisição, inicialmente, de uma cortadora a laser ou uma fresa, pois não dependem de material específico para funcionamento. Mesmo que as impressoras 3D (de gesso) pareçam mais acessíveis, o acesso e custos de material de consumo podem invalidar sua aquisição.

7.2.3. Treinamento de monitores e professores

Não adianta treinar apenas os alunos, é preciso também que os professores de projeto (e eventualmente de outras disciplinas) aprendam a utilizar as máquinas do laboratório para que possam sugerir exercícios de projeto com a utilização de maquetes produzidas por técnicas automatizadas. Por isso, é muito importante que a formação de

monitores e professores envolvidos com laboratórios que disponham de novas tecnologias seja constante e intensa. A experiência obtida no LAPAC demonstra que são necessárias ao menos 15 horas de treinamento para que um professor que já sabe utilizar programas de CAD aprenda a utilizar dois equipamentos básicos de prototipagem digital (cortadora a laser e impressora 3D). Além do treinamento de uso de máquina é importante que o professor efetivamente participe do projeto e da produção da maquete com mais tempo dedicado a cada técnica. Muitos dos problemas só aparecem no momento da execução do projeto. Da mesma forma, são essenciais algumas reuniões anuais para troca e compartilhamento de conhecimento sobre projetos desenvolvidos e demonstrações do uso dos equipamentos. A conscientização de professores de outras disciplinas da grade curricular sobre o uso dessas tecnologias também tem papel importante na interdisciplinaridade dos conteúdos, facilitando o intercâmbio de informações, consequentemente agregando conhecimento e qualidade de ensino.

7.2.4. Projetos de pesquisa e extensão

Os projetos de pesquisa e extensão aproximam o meio acadêmico da comunidade. Enquanto os primeiros visam desenvolver metodologias e aprofundar o conhecimento em assuntos específicos, os projetos de extensão têm o objetivo de aplicar o conhecimento gerado nas pesquisas, verificando sua aplicabilidade no mundo "real" e as possíveis complicações que podem surgir. Com toda sua inovação e diversidade de aplicação, as técnicas de prototipagem digital divulgadas por meio dos projetos de extensão, proporcionam uma propagação do conhecimento com a qual os laboratórios dessa natureza devem sempre contar para futuros projetos e desafios.

7.2.5. Convênios com outros laboratórios já implantados

Com o propósito de expansão de conhecimento e troca de informações, os convênios com outros laboratórios já implantados em outras universidades é fundamental. A troca de experiências é essencial e o compartilhamento de técnicas de outros laboratórios ajuda na diversidade de sua utilização. Como os equipamentos ainda são muito caros, o melhor é fazer um plano estratégico no momento da compra adquirindo equipamentos e técnicas diferentes entre universidades conveniadas para que possam ter um intercâmbio. Outro fator importante é o intercâmbio de mão de obra (especialistas), com o envio de pesquisadores, professores e alunos para outras universidades que possuam igualmente um laboratório.

Enfim, a experiência que o LAPAC adquiriu nesse último ano, com treinamento, projetos de extensão e de iniciação científica, serve como base para a implantação de outros laboratórios que estejam inseridos interdisciplinarmente na grade curricular dos cursos de arquitetura brasileiros.

8. Conclusões

A maneira como a arquitetura vem sendo concebida e implementada nas últimas décadas é um efeito do rápido desenvolvimento tecnológico, alavancado por experiências e pesquisas em aplicações inovadoras. O emprego de tecnologias CAD/CAM no processo de projeto permitiu aos arquitetos ultrapassar os limites da complexidade, alcançando com muito mais eficiência as necessidades e exigências do ser humano. Atualmente, essas tecnologias permitem a passagem completa da concepção de projeto à construção do edifício de forma rápida, eficiente e econômica, passando pelas etapas intermediárias de produção de maquetes e protótipos.

Nesta pesquisa foram apresentadas as principais tecnologias de prototipagem e fabricação digitais hoje possíveis de utilização para arquitetura, com exemplos de aplicações no ensino e na prática profissional. Além disso, foram descritas duas experiências de implantação de laboratórios de prototipagem digital em escolas de arquitetura com elevado grau de detalhes, incluindo a seleção de equipamentos, operacionalização dos laboratórios, treinamentos, pesquisas, etc. Vários experimentos pedagógicos com a transferência de tecnologia para professores e alunos foram executados, os quais permitiram o uso da prototipagem digital durante a execução dos trabalhos de final de graduação dos alunos do último ano do curso de arquitetura e urbanismo da FEC - Unicamp. O acompanhamento desses trabalhos mostrou as vantagens de utilização das novas técnicas no ensino de projeto, desde a concepção até sua apresentação final.

Ao final, foi elaborada uma proposta de inserção das tecnologias de prototipagem e fabricação digitais no currículo de cursos de arquitetura e as diretrizes para a implementação de um laboratório objetivando a disseminação desta tecnologia. As experiências obtidas durante o desenvolvimento desta pesquisa comprovam a necessidade imediata de interação entre o estudante de arquitetura e as novas

tecnologias de CAD/CAM e prototipagem rápida. A introdução do processo digital durante a formação do arquiteto, não como substituto da sua capacidade produtiva, nem da sua mente criativa, mas como incentivador do uso de maquetes físicas no processo de projeto, transforma e revela o perfil de um profissional capaz e consciente das novas tecnologias. A utilização de tecnologias de prototipagem e fabricação digitais não só permitem a criação de formas complexas, que talvez seriam impossíveis de serem construídas sem estes recursos, mas também reduzem a dependência do arquiteto de projetos e construções standardizados.

É papel de a universidade introduzir essas novas tecnologias no ensino e na pesquisa, de maneira que os jovens arquitetos estejam preparados para lidar com uma nova realidade profissional, na qual a tecnologia está presente cada vez mais nas diversas etapas do projeto. Espera-se que o alcance de bons resultados na formação de arquitetos inclua não somente equipamentos sofisticados e programas poderosos, mas também o desenvolvimento cuidadoso das etapas de projeto e uma interação com as demais disciplinas da grade curricular. As novas tecnologias devem integrar as disciplinas da grade curricular dos cursos de arquitetura, com uso consciente, principalmente por parte dos professores, cuja missão, na posição de educadores, é a de disseminar conhecimento, cultura e tecnologia.

Espera-se que esta tese possa contribuir para a efetiva inserção de novas tecnologias nos cursos de arquitetura no Brasil. Pretende-se a partir de agora dar continuidade à pesquisa, aprofundando o estudo das aplicações da digitalização 3D no processo de projeto, bem como da produção digital de formas e partes do edifício.

REFERÊNCIAS

ABRUZZO, E.; ELLINGSEN, E.; SOLOMON, J. (Eds) **Models**. New York: 306090 Books, 2007, p. 19.

ARTIS TECNOLOGIA. Disponível em: <<http://www.artis.com.br/index.html>> Acesso em: maio 2008.

BECHTHOLD, M. Teaching Technology: CAD/CAM, Parametric Design and Interactivity. In: eCAADe 25: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 25, 2007, Frankfurt, 2007.

BREEN, J.; STELLINGWERFF, M. The Digitile Project: conceiving, computing and creating contemporary tiling prototypes using computer aided modelling techniques. In: eCAADe 25: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 25, 2007, Frankfurt, 2007.

BUSWELL, R.; SOAR R.; GIBB, A.; THORPE, A. **Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction**. In: Automation in Construction 16, 2007, p.224–231.

CALDAS, L.; DUARTE, J. Implementation issues in generative design systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DESIGN COMPUTING AND COGNITION, 1, 2004, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA. p. 5.

CELANI, G; et al. Playing “doll house” in the museum: The use of 3D scanning and rapid prototyping techniques for producing scale models of sculptures. In: VSMM 2008 - DIGITAL HERITAGE –INTERNATIONAL CONFERENCE ON VIRTUAL SYSTEMS AND MULTIMEDIA, 14., 2008, Cyprus, 2008, p. 229-233.

CHASZAR, A (ED). **Blurring the Lines**. Grã Bretanha: Wiley-Academy, 2006.

CNPq, **Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil**. Disponível em: www.dgp.cnpq.br/buscaoperacional. Acesso em 25 de abril de 2008.

COENDERS, J. **What is SmartGeometry and where should it go?** Disponível em: <http://www.smartgeometry.org/node/23> Acesso em novembro 2008.

DAVIS, Stan. **Future Perfect**. Harlow: Addison-Wesley Pub Co, 1996.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP. **Vinyl cutter examples**. Disponível em: http://ddf.mit.edu/devices/vinyl_cutter_examples.html Acesso em: abril 2008.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP. **Devices - Modella Miller** Disponível em: http://ddf.mit.edu/devices/modella_miller.html Acesso em: abril 2008.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP. **Devices - Denford Miller** Disponível em: http://ddf.mit.edu/devices/denford_miller.html Acesso em: abril 2008.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP. **Denford Miller examples** Disponível em: http://ddf.mit.edu/devices/denford_miller_examples.html Acesso em: abril 2008.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP. **Devices - ZCorp 3D Printer**. Disponível em: http://ddf.mit.edu/devices/zcorp_3d_printer_examples.html Acesso em: 22 set. 2006f.

DOHMEN, P. RÜDENAUER, K. Digital Chains in modern Architecture. In: eCAADe 25: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 25, 2007, Frankfurt, 2007, p. 801-804.

DORTA, T. Hybrid Modeling: Manual and digital media in the first steps of the design process. In: eCAADe 23: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 23., 2005, Lisboa, 2005, p. 819-827.

DUARTE, J.P. **Customizing Mass Housing: a discursive grammar for Siza's houses at Malagueira**. Tese de doutorado, Massachusetts Institute of Technology, 2001.

DUARTE, J. **Inserção das novas tecnologias no curriculum de arquitectura – uma experiência**. Revista Arquitetura e Vida, Lisboa, n. 7, p. 106-110, jan. 2007.

DUARTE, J., BENTO, J., MITCHELL, W. (eds.). **Remote Collaborative Design: The Lisbon Charrette**. Lisboa: IST Press, 1999.

FELL, A.; XIMENES, A., RODRIGUES FILHO, J. **Pesquisa Qualitativa em Sistemas de Informação (S.I.) no Brasil: Uma Análise da Produção Acadêmica**. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 11, 2004, Bauru, São Paulo. Anais do 11º SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Bauru, 2004. P. 97-101.

FERNANDES, E.; ALMEIDA L. **Métodos e técnicas de avaliação: contributos para a prática e investigação psicológicas**. Braga: Universidade do Minho. Centro de Estudos em Educação e Psicologia, 2001. ISBN 972-8098-98-7. P. 49-76.

GAMBINO, M. et al. **A 3D Scanning Device for Architectural Relieves Based on Time-Of-Flight Technology**. In: SPRINGER PROCEEDINGS IN PHYSICS - LASERS IN THE CONSERVATION OF ARTWORKS, 2006, Germany, 2006.

GANE, V. **Parametric design: a paradigm shift?** 2004, 97 f. Tese (Doutorado) - Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

GODOI, C.; BANDEIRA-DE-MELLO, R.; SILVA, A. **Pesquisa Qualitativa em Estudos Organizacionais: Paradigmas, Estratégias e Métodos**. 1 ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

GRIMM, T. Fused Deposition Modeling: A technology evaluation. T.A. Grimm & Associates, Inc. 2002. Disponível em: www.atirapid.com. Acesso em abril 2008.

GRIMM, T. Stereolithography, Selective Laser Sintering and PolyJet: Evaluating and applying the right technology. Accelerated Technology, Inc. Disponível em: www.atirapid.com. Acesso em abril 2008.

HENRIQUES, P. ; SAMPAIO, A. Construction planning tool based on virtual reality technology. In: EPMESC IX: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENHANCEMENT AND PROMOTION OF COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING AND SCIENCE, 19., 2003, Macau, 2003, p.591-598.

KAPLAN, A.; HAENLEIN, M. Toward a parsimonious definition of traditional and electronic mass customization. In: Journal of product innovation management 23, VOL. 2, 2006.

KHOSHNEVIS, B. **Automated construction by contour crafting - related robotics and information technologies**. Automation in construction, 2004. v.13, n.2, p. 05-19.

KLINGER, K. Making Digital Architecture: Historical, Formal, and Structural Implications of Computer Controlled Fabrication and Expressive Form. In: eCAADe 19: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 19., 2001, Helsinki, 2001.

KLINGER, K. Information Exchange in Digitally Driven Architecture. In: Sigradi 2007: SOCIEDADE IBERO-AMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 11., 2007, Cidade do México, 2007, P. 300-304.

KOLAVERIC, B. **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing**. Oxford: Taylor & Francis, 2005. 314 p. ISBN 0-415-27820-1.

KOLAVERIC, B. **Digital Morphogenesis, Architecture in the Digital Age: Designing and Manufacturing**. London: Spon Press, 2003.

KRISSEL, M. Frederick Kiesler: Inside the Endless House. University of Pennsylvania, 2006. Disponível em: www.psu.edu/arch Acesso em: set 2008.

LYON, E. Design for Manufacturing in Architecture Mapping in between Curved Surfaces Design and Fabrication. In: eCAADe 23: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 23., 2005, Lisboa, 2005, p. 245-252.

MARK, E.; MARTENS, B.; OXMAN, R. **The Ideal Computer Curriculum**. In: Anais do 19 eCAADe, 2000. pp. 168-175

MIT. **Exemplo de aplicação da cortadora de vinil:** Open Course Ware Architecture 4-510 Fall 2005. Disponível em: <<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Architecture/4-510Fall-2005/Assignments/index.htm>> Acesso em: maio 2006.

MIT. **Exemplo de aplicação da cortadora a jato de água:** MIT Open Course Ware Architecture 4-510 - Fall 2005. Disponível em: <http://ddf.mit.edu/courses/examples/4.510_example_b.pdf> Acesso em: maio 2006.

MIT. **Exemplo de objeto feito com a cortadora a laser e com FDM:** MIT Open Course Ware Architecture 4-510 Fall 2005. Disponível em: <<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Architecture/4-510Fall2005/Assignments/index.htm>> Acesso em: maio 2006.

MITCHELL, W. **The Logic of Architecture: design, computation and cognition.** Cambridge: MIT Press, 1990.

MITCHELL, W.; McCullough M. **Digital Design Media.** N. York: Van Nostrand Reinhold, 1994.

OOSTERHUIS, K. **File to Factory and Real Time Behavior in ONL-Architecture.** 2005. Disponível em: <<http://www.oosterhuis.nl/quickstart/index.php?id=457>> Acesso em: julho 2008.

PINE, B. **Mass Customization - The New Frontier in Business Competition.** Boston, Mass.: Harvard Business School Press, 1993.
Pottman, H., et al. **Architectural Geometry.** Exton: Bentley Institute Press, 2007.

POLLACK, S. **SKETCHES of Frank Gehry.** Produção de Sidney Pollack. Editado por Karen Schmeer A.C.E. Culver City, California: SONY PICTURES, 2006. 1 DVD (84 min).

POTTMANN, H. et al. **Architectural Geometry.** Londres: Bentley Institute Press, 2007.

PUPO, R.; DUARTE, J.; CELANI, G. Introducing digital fabrication into the architectural curriculum: two similar experiences in different contexts. In: eCAADe 26: EDUCATION

AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 26., 2008, Antwerp, 2008, p. 517-524.

ROWE, J. **Trends in Reverse Engineering. Affordability and greater ease of use result in more respect for the reverse-engineering market.** In: Cadalyst, 2008. Disponível em: <http://manufacturing.cadalyst.com/manufacturing/MCAD/Trends-in-Reverse-Engineering/ArticleStandard/Article/detail/514695>. Acesso em Agosto 2008.

RYDER, G.; ION, B.; GREEN, G.; HARRISON, D.; WOOD, B. **Rapid design and manufacture tools in architecture.** Automation in construction, Amsterdam: Elsevier, 2002. v.11, n.2, p. 279-290.

SASS, L., OXMAN, R. Materializing design: the implications of rapid prototyping in digital design. **Design Studies**, 2006, v. 27, p. 325-355.

SÁ, A. et al. **Coded structured light for 3D-Photography: an overview.** In: RITA, Vol. IV, n. 2. 1999.

SAURA, C. **Aplicação da prototipagem rápida na melhoria do processo de desenvolvimento de produtos em pequenas e médias empresas.** Campinas, 2003. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

SATYAPRAKASH, D. **Laser Scanners in Terrestrial Surveying.** The Global Geospatial Magazine. 2007

SCHEER, S. Desafios da tecnologia BIM em um país emergente. In: WORKSHOP BRASILEIRO DE GESTÃO DO PROCESSO DE PROJETOS NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS, 8., 2008, São Paulo: USP, 2008. Mesa-redonda. Disponível em: <http://www.arquitetura.eesc.usp.br/workshop08/>. Acesso em 04 nov. 2008.

SCHMAL, P. **Digital Real.** Basel: Birkhauser, 2001.

SCHODEK, D. et al. **Digital Design and Manufacturing.** New Jersey: John Wiley and sons, 2005.

SEEBOHM, T. The Ideal Digital Design Curriculum: Its Bases and its Content; In: eCAADe 19: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 19., 2001, Helsinki, 2001.

STRAUD, E. Et al. **ABC do Redering**. Curitiba: Infólio editorial, 2004.

STELLINGWERFF, M; BREEN, J. Towards ornamatics. In: eCAADe 23: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 23., 2005, Lisboa, 2005, p. 253-260.

SHELDEN, D. **Digital surface representation and the constructibility of Gehry's architecture**. Cambridge, MA, 2002. 340 f. Thesis (PhD) - Dept. of Architecture, Massachusetts Institute of Technology.

SILVA, J. Prototipagem rápida e aplicações. In: CURSO DE ENGENHARIA DE SUPERFÍCIES, 2008, Campinas: FEM/UNICAMP, 2008. Palestra ministrada.

SIMONDETTI, A. Computer-generated physical modeling in the early stages of the design process. **Automation in construction**, 2002. v.11, n.2, p. 303-311.

Smart Geometry Group, <http://www.smartgeometry.org./node/70>,

STRAUSS, A.; CORBIN, J. **Grounded Theory in Practice** / editors. 2. ed. London: Thousand Oaks: Sage Publications, 1998.

SZALAPAJ, P. The Digital Design Process in Contemporary; Architectural Practice. In: Sigradi 2005: SOCIEDADE IBERO-AMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 9., 2005, Lima, 2005.

TSENG, M.; Jiao, J. **Mass Customization**. In: Handbook of Industrial Engineering, Technology and Operation Management, 2001.

VIEIRA, E. **Produção digital de maquetes arquitetônicas: um estudo exploratório**. Campinas, 2007. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.

VOLPATO, N. et al. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2007.

What is Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing, & 3D Printing?
<http://www.rapidtoday.com/index.php?id=75>. Acesso em março 2008.

WOHLERS, T. **Wohlers report 2007**. Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates, 2007.

WOHLERS, T. **Wohlers report 2008**. Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates, 2008.

ZCORP. Sistema 3DP da ZCorporation. Disponível em:
<<http://zcorp.com/products/printersdetail.asp?ID=1>> Acesso em: fev. 2008.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BALTAZAR, A. E-futuros: projetando para um mundo digital. **Portal Vitruvius**, São Paulo, Junho 2001. Seção Arqtextos, 013.077. Disponível em:
<<http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/esp077.asp>>. Acesso em: dezembro 2006.

BANON, G. **Bases da computação gráfica**. São Paulo: Campus, 1989.

BENTO, J. et al. **Collaborative design and learning: Competence Building for Innovation**, Connecticut: PRAEGER, 2004. 381 p. ISBN 1-56720-545-3.

CALDAS, L.; Duarte, J. Implementation issues in generative design systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DESIGN COMPUTING AND COGNITION, 1, 2004, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA. P. 5.

CELANI, G. eCAADe'23: A busca de novos paradigmas para a geração da forma arquitetônica assistida pelo computador. **Portal Vitruvius**, São Paulo, Janeiro 2006. Seção Drops, 13.06, Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/drops/drops13_06.asp>. Acesso em: Junho 2006.

CELANI, G.; PUPO, R.; MENDES, G. e PINHEIRO, É. Generative design systems for housing: an outside-in approach. ECAADE'05, Lisboa, IST, setembro 2005. Disponível em: <<http://www.civil.ist.utl.pt/ecaade05/>>. Acesso em janeiro 2006.

CHRISTAKOU, E., **A simulação da luz natural aplicada ao projeto de arquitetura**. 2004. 147 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

CHU, K. et al. **Arquiteturas Genéticas (II)**. Barcelona, Spain: EXARQ/SITES Books, 2005.

DUARTE, J. Inserting new technologies in undergraduate architectural curricula. In: eCAADe 25: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 25., 2007, Frankfurt, 2007.

DUARTE, J.; BEIRÃO, J. **Customizing mass housing: a studio experiment**, Lisboa: Centro Editorial da Faculdade de Arquitetura de Lisboa, 2003. ISBN 972-97354-2-5.

EINAR, K. et al. The Trondheim Camera Obscura: A Case Study on Digital and Analogue Project Development in Timber Construction. In In: eCAADe 25: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 25., 2007, Frankfurt, 2007.

FELL, A.; Ximenes, A., Rodrigues Filho, J. Pesquisa Qualitativa em Sistemas de Informação (S.I.) no Brasil: Uma Análise da Produção Acadêmica. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 11, 2004, Bauru, São Paulo. **Anais do 11º SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, Bauru, 2004. P. 97-101.

FERNANDES, E. ; ALMEIDA L. **Métodos e técnicas de avaliação: contributos para a prática e investigação psicológicas**. Braga: Universidade do Minho. Centro de Estudos em Educação e Psicologia, 2001. ISBN 972-8098-98-7. P. 49-76.

FISCHER, T.; HERR, C. Teaching Generative Design in C. In: INTERNATIONAL GENERATIVE ART CONFERENCE, 4, 2001, Milão. **Anais eletrônicos do 4th INTERNATIONAL GENERATIVE ART CONFERENCE**, Milão. Disponível em: <http://www.generativeart.com/>. Acesso em: maio 2006.

FRICKER, P., et al. Organised Complexity: Application of Statistical Design in Large-Scale Building Projects. In: eCAADe 25: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 25., 2007, Frankfurt, 2007, p. 695-701.

GANE, V. **Parametric design: a paradigm shift?** 2004. 97 f. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2004.

GERARD, R., et al. **Rapid Design and Manufacture (RDM) Centre, Rapid Prototyping Group**. In: Automation in Construction 11, 2002, p. 279– 290.

GIBSON, I., KVAN, T., MING, L. Rapid Prototyping for architecture models. Rapid Prototyping Journal. Vol 8, nº2, pp. 91-99, 2002. Emerald. Disponível em: <http://www.emalddinsight.com/1355-2546.htm> Acessado em Maio 2008. Acesso em: Junho 2008.

GIL, A. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

GODOI, C.; BANDEIRA-DE-MELLO, R.; SILVA, A . **Pesquisa Qualitativa em Estudos Organizacionais: Paradigmas, Estratégias e Métodos**. 1 ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

HANSEN, B.; KAUTZ, K. Grounded Theory Applied - Studying Information Systems Development Methodologies in Practice. In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 38th, 2005, Hawaii - USA. **Anais eletrônicos do 38 HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES**, Hawaii, 2005. p. 1-10. Disponível em: <<http://www.mit.edu/~tknight/IJDC/>> Acesso em: junho 2006.

KENSKI, V. A profissão do professor em um mundo em rede: exigências de hoje, tendências e construção do amanhã: professores, o futuro de hoje. **Tecnologia Educacional**, 1998. Faculdade de educação, USP. São Paulo: 1998.

LACOMBE, O. **Diagramas digitais: pensamento e gênese da arquitetura mediada por tecnologias numéricas**. 2006. 247 f. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. **Building Design Advisor Software Description**. Berkeley, EUA, 2001. Disponível em: < <http://gaia.lbl.gov/BDA/bdainfo.htm>>. Acesso em: maio 2005.

MARX, J. A proposal for alternative methods for teaching digital design. **Automation in Construction**, vol. 9, p.19-35, 2000. MCGILL, M. C. **A visual approach for exploring computational design**. 2001. 139 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2001.

MITCHELL, W. **The theoretical foundation of computer-aided architectural design**. In: Environment and Planning B, 1975, v.2, p.127-150.

MONEDERO, J. Autoaprendizaje, Integración Transversal y Diseño 3D. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE GRÁFICA DIGITAL, X, 2006, Santiago. **Anais do X CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE GRÁFICA DIGITAL**. Santiago: Universidad de Chile, 2006. P 80-83.

NEGROPONTE, N. Toward a Theory of Architecture Machines. **Journal of Architectural Education (1947-1974)**. Vol. 23, No. 2, p. 9-12. Março 1969. Disponível em:<<http://links.jstor.org/sici?sici=0047-2239%28196903%2923%3A2%3C9%3ATATOAM%3E2.0.CO%3B2-M>>. Acesso em janeiro 2007.

OLIVEIRA, J. **Construindo com Bits - análise do processo do projeto assistido por computador**. 2006. 218 f. Qualificação (Mestrado em Arquitetura) - Depto. de Arquitetura e Urbanismo, EESC – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

OXMAN, R. Think-maps: teaching design thinking in design education. **Design Studies**, vol. 25, no.1, p.63-91, 2004.

OXMAN, R. STREICH, B. Digital Media and Design Didactics in Visual Cognition. In: eCAADe 19: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 19., 2001, Helsinki, 2001.

PAPAMICHAEL, K. Building Design Advisor. **Environment Energy Technologies Division Newsletter**, Berkeley, EUA, 1999. Disponível em <<http://eetd.lbl.gov/newsletter/nl3/bda.html>>. Acesso em: maio 2005.

PAPAMICHAEL, K., **Building Design Advisor**. Disponível em <<http://ciece.ucop.edu/Papamichael1998/>>. Acesso em: maio 2005.

PAPAMICHAEL, K.; PROTZEN, J. The limits of intelligence in design. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SYSTEMS RESEARCH, INFORMATICS AND CYBERNETICS, 4th, 1993, Baden. **Anais do 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SYSTEMS RESEARCH, INFORMATICS AND CYBERNETICS**,. Baden: Focus Symposium on “Computer-Assisted Building Design Systems”, 1993.

PUPO, R. **Panorama do uso do computador no ensino de projeto arquitetônico e na disciplina de informática aplicada à arquitetura**. 2002. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2002.

PUPO, R.; CELANI, G. Trends in graduate research on IT & Architecture: a qualitative comparison of tendencies in Brazil and abroad. In: ECAADE – EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE, 25., 2007, Frankfurt, Alemanha. **Anais do ECAADE – EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE**, Frankfurt: no prelo

PUPO, R. I International Workshop Digital Design for Architecture - concepção arquitetônica em ambiente computacional. **Portal Vitruvius**, São Paulo, Junho 2007. Seção Arquitextos. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/esp414.asp>>. Acesso em: junho 2007.

ROCHA, A. J. M. **Architecture Theory 1960-1980: Emergence of a computational perspective**. 2004. 196 f. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Departamento de Arquitetura, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2004.

SANTILLANA, G. **O papel da arte no renascimento científico**. Tradução Eunice Ribeiro Costa, Revisão técnica de Sylvia Ficher. 1 ed. São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de São Paulo, 1981. 52

SCALETISKY, C. C. Criação de bibliotecas de conceitos a partir de uma base de projetos de arquitetura. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE GRÁFICA DIGITAL, X, 2006, Santiago. **Anais do X CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE GRÁFICA DIGITAL**. Santiago: Universidad de Chile, 2006. P 312-315.

SELETSKY, P. Digital Design and the Age of Building Simulation. **AECBytes**, Outubro 2005. Seção Viewpoint, n. 19, Disponível em: <http://www.aecbytes.com/viewpoint/2005/issue_19.html>. Acesso em Janeiro, 2006.

SCHINDLER, C., et al. Reflecting on a 1:1 Seminar with Digital Sheet Metal Fabrication. In: eCAADe 25: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, 25., 2007, Frankfurt, 2007, p. 801-804.

SOWA, A. Computer-Aided Architectural Design vs. Architect-Aided Computing Design Architect/computer interaction in the digital design process on the example of advanced CAAD/CAAM project. In: Sigradi 2005: SOCIEDADE IBERO-AMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 11., 2007, Caracas, 2005.

STRAUSS, A.; CORBIN, J. **Grounded Theory in Practice / editors**. 2. ed. London: Thousand Oaks: Sage Publications, 1998.

TERZIDIS, K. **Algorithmic architecture**. Cambridge: Architectural Press, 2006.

VINCENT, C. Ensino de Projeto: Digital ou Manual?. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE GRÁFICA DIGITAL, X, 2006, Santiago. **Anais do X CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE GRÁFICA DIGITAL**. Santiago: Universidad de Chile, 2006. P 236-240.

APÊNDICE I - Teses brasileiras

Análise de dissertações e teses brasileiras defendidas entre 1999 - 2006																							
	Ano	Mestrado / Doutorado	Implantação tecnologia CAD no Brasil	Análise e avaliação de programas CAAD	Apoio CAD às etapas de criação e projeto	Etapas legais de projeto	Interação CAD/Usuário	Composição arquitetônica	Modelagem 3D Topologia	Conforto ambiental	Fases iniciais de Projeto	História e Ensino de projeto	CAD no ensino de projeto	CAD no ensino de desenho	Layout de laboratórios de CAD	CAD via Web / (AVA-AD)	TRIZ	Processo de Projeto	Gestão de empresas de projeto	Programa-ção / Algoritmo	Implementação	Estudo de caso (Metodologia)	
Análise de dissertações e teses brasileiras defendidas entre 1999 - 2006																							

	Ano	Mestrado / Doutorado	Implantação tecnologia CAD no Brasil	Análise e avaliação de programas CAAD	Apoio CAD as etapas de criação e projeto	Etapas legais de projeto	Interação CAD/Usuário	Composição arquitetônica	Modelagem 3D Topologia	Conforto ambiental	Fases iniciais de Projeto	História e Ensino de projeto	CAD no ensino de projeto	CAD no ensino de desenho	Layout de laboratórios de CAD	CAD via Web / (AVA-AD)	TRIZ	Processo de Projeto	Gestão de empresas de projeto	Programação / Algoritmo	Implementação	Estudo de caso (Metodologia)
(cont.)	2004	M																				
	2005	M																				
	2005	M																				
	2005	D																				
	2005	D																				
	2006	M																				
	2006	M																				
	2006	D																				
	2006	M																				
	2006	M																				
	2006	M																				

Apêndice II – Teses estrangeiras

Análise de dissertações e teses estrangeiras defendidas entre 1999 - 2006																				
	Ano	Mestrado / Doutorado	Interação CAD com processo e/ou projeto	Características Qualitativas e Quantitativas do CAD	Tradicionais CAD tools x	Geometria / Topologia	Interação CAD Usuário	CAD Drafting & Usuário	Processo de projeto	Shape Grammar	Digital Learning tools	CAAD na Web / Projeto colaborativo	Decision making support / Early stages	Visualization & form exploration (2D-3D)	CAM	Realidade Virtual	Programação / Algoritmos / Modelos matemáticos	Implementação	Nome do Protótipo	Estudo de caso (Metodologia)

	Ano	Mestrado / Doutorado	Interação CAD com processo e/ou projeto	Características Qualitativas e Quantitativas do CAD	Traditional tools x CAD tools	Geometria / Topologia	Interação CAD Usuário	CAD & Drafting	Processo de projeto	Shape Grammar	Digital Learning tools	CAD na Web / Projeto colaborativo	Decision making support / Early stages	Visualization & form exploration (2D-3D)	CAM	Realidade Virtual	Programação Algoritmos Modelos matemáticos	Implementação	Nome do Protótipo	Estudo de caso (Metodologia)
(cont)																			Structural Sketcher	
Structural Sketcher. A tool for supporting architects in early design. Computers, cladding, and curves: The techno-morphism of Frank Gehlys Guggenheim Museum in Elbabo-Spain.	2004	D																		
Gehlys Guggenheim Museum in Elbabo-Spain.	2004	D																		
Parametric design: a paradigm shift?	2004	M																		
A working prototype of distributed collaborative architectural design system.	2004	D																		
Uncertainties of reason : pragmatist plurality in basic design education.	2004	D																		
An exploration of protean elements as representations in a computer aid for design.	2004	D																	Proteus	
Knowledge Trading : computational support for individual and collaborative sense-making activities.	2004	D																		
Parametric design methodology and visualization for single curvature tensegrity structures.	2004	D																		
Architecture Theory, 1960-1980: emergence of a computational perspective	2004	D																		
Design Process error-proofing.	2005	D																		
A design method and computational architecture for generating and evolving building designs.	2005	D																		
An investigation of learning the fundamentals of drafting using hand instruments versus computer-aided drafting.	2005	D																	K&R 20	
A Process and Competency-Based Approach to High Performance Building Design	2005	D																	Decision-based	
Virtual context: Investigating the characteristics and opportunities of Digital visualization media for situated approaches to architectural design in an urban environment.	2005	D																		
Computer-aided conceptual building design.	2005	D																		
Constructing process models from distributed design activity.	2005	D																		
Architectural explorations A formal representation for the generation and transformation of design geometry.	2005	D																	Interactive Design Track	
Requirement-driven design Assistance for information traceability in design computing.	2005	D																		
Conceptual design tools for architects	2005	D																		
Hybrid sketching : a new middle ground between 2D and 3D.	2005	D																		
Representation and reasoning for integrated conceptual design of building structures.	2005	D																		
Process makes perfect.	2005	M																		
On Architectural knowledge and form generation: A theoretical framework using knowledge-based system.	2005	D																		
Technology as 'praxis of inquiry' in architectural design Adaptability modulation emergence.	2005	M																		
Development of three-dimensional virtual building simulation from two-dimensional architectural floor plans.	2005	M																		
An investigation of the relationship between manufacturing organizations and computer-aided design.	2006	D																		

APÊNDICE III - Grupos de Pesquisa CNPq

Banca	Grupo de Pesquisa	Home Page	Ano de formação	Líder do Grupo	E-mail	Área predominante	Instituição	Órgão	Unidade	Cidade	Linhas de pesquisa	Palavras-chave da linha de pesquisa	Objetivo da linha de pesquisa
1	Prototipagem Rápida	Laboratório de Estudos Computacionais em Projeto	2000	Neander Furtado Silva	neander@umb.br	Ciências Sociais Aplicadas: Arquitetura e Urbanismo	Universidade de Brasília - UNB	Faculdade de Arquitetura e Urbanismo	Departamento de Projeto	Brasília	Prototipagem rápida	processo de projeção	
											Fabricação Digital	automação, construção	
											Tecnia e Prática de Projeto Assistido por Computador	Arquitetura, Computação Gráfica, Prática e Teoria de Projeto	Investigar as relações, implicações e potencial do uso de sistemas computacionais na prática de projeto de arquitetura.
2	Prototipagem Rápida	Núcleo de prototipagem e feramental – NUFER	2002	Nen Volpato	nvoluta@ufpr.edu.br	Engenharias: Engenharia Mecânica	Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR	Damec		Curitiba	Prototipagem Rápida	FDM, Layer Manufacturing, Manufatura Aditiva, Prototipagem Rápida, Rapid Prototyping.	Visa o desenvolvimento e otimização de tecnologias de fabricação de protótipos baseadas no princípio da manufatura por camada, também conhecidas como tecnologias de Manufatura Rápida.
											Feramental Rápido	CAD/CAM; Feramental Rápido; Prototipagem Rápida; Usinagem CNC	Visa o desenvolvimento de tecnologias de fabricação que objetivam a confecção de modelos protótipos que serão utilizados para produzir protótipos. Recorre-se ao Feramental Rápido quando se deseja protótipos em um maior número e/ou com características mecânica mais próximas do produto final. Incluem-se nestas tecnologias a Prototipagem Rápida e também a usinagem CNC auxiliada por sistemas CAD/CAM.
											Fermentais Computacionais de Auxílio à Manufatura	CAD/CAM; Pre-set de Fermentais; Usinagem CNC	Visa o desenvolvimento de aplicativos (softwares) para o auxílio ao processo de fabricação, em especial ao processo de usinagem CNC, em vários aspectos. Algumas das áreas de atuação são: programação CNC, planejamento de ferramentas, na comunicação com a máquina CNC, etc.
3	Prototipagem Rápida	Teorias e tecnologias contemporâneas aplicadas ao projeto	2006	Gabriela Celani	celani@ufv.br	Ciências Sociais Aplicadas: Arquitetura e Urbanismo	Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG	Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo	Departamento de Construção Civil	Campinas	Prototipagem Rápida		Representação física tridimensional por meio do uso de feramental rápido, a partir de modelos criados em softwares de modelagem 3D.
4	Prototipagem Rápida	CIMECT	1993	Carlos Henrique Aliens	chaliens@ufsc.br	Engenharias: Engenharia Mecânica	Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC	Departamento de Engenharia Mecânica		Fpolis	Projeto e fabricação de componentes injetados	CAE/CAD/CAM; comando numérico; feramental rápido (Rapid Tooling); moldagem por prototipagem rápida (Rapid Prototyping).	Desenvolver pesquisas voltadas ao entendimento de tecnologias e processos que integram as atividades de projeto e fabricação de componentes de plástico moldados por injeção. Neste contexto estão inseridas as tecnologias de CAE/CAD/CAM, projeto e fabricação de moldes, prototipagem rápida e feramental rápido.
5	Prototipagem Rápida	Desenvolvimento Integrado de Produtos	2004	Cristiano Vasconcellos Ferreira	cristiano@ufma.br	Engenharias: Engenharia Mecânica	SENAI	SENAI Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial	Ciência - Ciências Integradas de Manufatura e Tecnologia	Salvador	Prototipagem Rápida	Desenvolvimento de Produtos, prototipagem rápida	Envolve o desenvolvimento de conhecimentos, métodos e técnicas de prototipagem rápida, visando ao desenvolvimento rápido de produtos.
6	Prototipagem Rápida	NUMA - Núcleo de Manufatura Avançada	1996	Henrique Rosentfield	roz@pq.cnpq.br	Engenharias: Engenharia de Produção	Universidade de São Paulo - USP	Escola de Engenharia de São Carlos	Departamento de Engenharia de Produção	São Carlos	Prototipagem e Feramental Rápido	feramental; Prototipagem rápida	Desenvolvimento de Feramental Rápido para produção de moldes de baixas séries - estudo-se técnicas de fabricação de moldes voltados a baixas séries a partir de técnicas de prototipagem rápida para aplicação por usinagem CNC. O objetivo desta pesquisa é analisar obras de arquitetura por meio modelos tridimensionais, simulações digitais e prototipagem rápida. Utilizamos a TI, particularmente a modelagem de elementos arquitetônicos BIM. São analisados a estrutura por elementos finitos, conforto térmico e ventilação por CFD e iluminação direta e indireta.
7	Arquitetura	Arquitetura, processo de projeto e análise digital	2005	Wilson Florio	wflorio@mackenzie.br	Ciências Sociais Aplicadas: Arquitetura e Urbanismo	Universidade Presbiteriana Mackenzie - MACKENZIE		Departamento de Projetos Arquitetônicos	São Paulo	Análise digital de obras de Arquitetura Moderna e Contemporânea	Análise Digital, BIM, Modelagem 3D, Tecnologia da Informação	Incorporação de novos procedimentos projetuais e gestonários, baseados em tecnologias avançadas de informática que possibilitem melhor comunicação entre campo de obra e escritório. Modelagem 3D, realidade virtual, realidade aumentada, especializada, através de jogos e tutoriais eletrônicos; atualização tecnológica da mão da obra especializada desenvolvimento de métodos e técnicas para informatização do processo de projeto.
8	Arquitetura	Estúdio Virtual de Arquitetura - EVA	1997	Maria Lúcia Malard	maria.malard@ua.br	Ciências Sociais Aplicadas: Arquitetura e Urbanismo	Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG	Escola de Arquitetura	Departamento de Projetos	Belo Horizonte	Tecnologias Digitais Para o Projeto Participativo e Apoio à Gestão Habitacional	Arquitetura e Urbanismo; Cave da Tecnologia simplificada; Fotografia convergente de proximidade; informática eletrônica; jogos para aprender construir	
9	Arquitetura	GRUA - Grupo de Pesquisa em informática aplicada em Engenharia e Arquitetura	2003	Claudio Abades Jacoski	claudio@nochapeco.edu.br	Engenharias: Engenharia Civil	Universidade Regional de Chapecó - UNOCHAPECO	Centro Tecnológico		Chapeco	Interoperabilidade e de sistemas computacionais em construção civil	integração de sistemas computacionais; interoperabilidade; recuperação da informação;	Estudo das técnicas para construção e integração de sistemas computacionais voltados para as diversas áreas da indústria da construção civil

Busca	Grupo de Pesquisa	Home Page	Ano de formação	Líder do Grupo	Email	Área predominante	Instituição	Órgão	Unidade	Cidade	Linhas de pesquisa	Pesquisador da linha de pesquisa	Palavras-chave da linha de pesquisa	Objetivo da linha de pesquisa
10	CAD		2007	César Inai	cimai@uem.br	Ciências Sociais Aplicadas: Arquitetura e Urbanismo	Universidade Estadual de Maringá - UEM	Centro de Tecnologia	Departamento de Arquitetura e Urbanismo	Maringá	Influência do modelo representacional na Arquitetura	César Inai; Maurício Hidemi Aizawa; Roenir Bertola Duarte	CAD; computação gráfica; maquetes; modelos aplicados a tecnologias híbridas, digitais e/ou analógicas na compreensão do ambiente pelo usuário e nas simulações tridimensionais. Busca-se também avaliar os instrumentos de representação, suas características e consequências no processo projetual, no produto final e na relação entre estes.	Pesquisar o papel do modelo representacional arquitetônico no processo comunicativo entre os agentes envolvidos nas etapas de projeto, construção e comercialização do ambiente construído. Serão aplicadas tecnologias híbridas, digitais e/ou analógicas na compreensão do ambiente pelo usuário e nas simulações tridimensionais. Busca-se também avaliar os instrumentos de representação, suas características e consequências no processo projetual, no produto final e na relação entre estes.
11	CAD		2002	Alexandre Dias da Silva	adiass@pq.cnpq.br	Engenharias; Engenharia Mecânica	Universidade Federal de Santa Maria - UFSM	Núcleo de Automação e Processos de Fabricação Návia	Centro de Tecnologia	Santa Maria	Integração CAD/CAM	Alexandre Dias da Silva; Leandro Costa de Oliveira	CAD/CAM	Implementar rotinas em ambiente CAD para criar funções de geração automática de programas para máquinas de comando numérico
12	CAD	www.cadtec.deas.ufmg.br	1997	Jose Ricardo Queiroz Franco	franco@pq.cnpq.br	Engenharias; Engenharia Civil	Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG	Escola de Engenharia	Departamento de Engenharia de Estruturas	Belo Horizonte	Computação Gráfica (Tecnologia CAD/CAE/CAM) Aplicada à Automação de Processos	Felício Bruzzi Baros; Jacqueline Maria Flor; Jose Ricardo Queiroz Franco	Automação; Animação; Modelamento; Geométrico; Multimídia; Programação Orientada a Objetos;	Automação de processos de engenharia via tecnologia CAD/CAE/CAM visando a melhoria da produtividade e da qualidade do produto e o aumento da competitividade do setor produtivo.
13	CAD	http://www.sociasc.org.br	2002	Adriano Fagali de Souza	adriano.fagali@sociasc.org.br	Engenharias; Engenharia Mecânica	Sociedade Brasileira de Santa Catarina - SOCIASC	Instituto Superior Tupi	Núcleo de Mecânica	Joinville	Fabricação de Moldes e Matrizes	Adriano Fagali de Souza	CAD/CAM; Estratégias de fabricação; Freqüência 3 eixos; Moldes em aço; Usinagem em altas velocidades;	Desenvolver o processo de fabricação de moldes e matrizes. Aplicar de novas tecnologias, sistemas CAD/CAM, Máquinas CNC; Usinagem em altas velocidades (NSC); Fresamento 5 eixos
14	CAD		1998	Pedro Colmar Gonçalves da Silva Velasco	p.velasco@pq.cnpq.br	Engenharias; Engenharia Civil	Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ		Rio de Janeiro		Sistemas Integrados na Construção	Ana Cristina Castro Fontenla Sierra	CAD; Construção; Engenharia Simuladas; Gerência; Processos Construtivos; Projeto	Esta linha de pesquisa de envolverá o entendimento, organização e interação de todas as fases relativas aos projetos: arquitetônico, urbanístico, estrutural, geotécnico, de instalações em suas etapas (básico e executivo) Ela também abrangera a integração com o orçamento, planejamento, fluxo financeiro, execução e montagem de uma construção
15	CAD	http://www.ufba.br/~icad	1992	Analdo Leão de Anóim	alamoim@pq.cnpq.br	Ciências Sociais Aplicadas: Arquitetura e Urbanismo	Universidade Federal da Bahia - UFBA		Departamento de Criação e Representação Gráfica	Salvador	Projeto Auxiliado por Computador	Analdo Leão de Anóim	CAD; Computação Gráfica; Projeto Automatizado	
16	CAD	http://dsq.ee.ufjf.br/~lamp	2000	Fernando Rodrigues Lima	flima@dsq.ee.ufjf.br	Engenharias; Engenharia de Produção	Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ		Departamento de Expressão Gráfica	Rio de Janeiro	Projeto de edificações assistido por computador	Angela Maria Gabriella Rossi		pesquisar e implementar técnicas e métodos para projetos de edificações habitacionais empregando recursos informatizados, no ambiente CAD
17	CAD	www.unimep.br/feia/ufscpm	1995	Klaus Schützer	schuetzer@unimep.br	Engenharias; Engenharia Mecânica	Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP	Faculdade de Engenharia e Urbanismo	Laboratório de Sistemas de Computação e Projetos de Manufatura	Santa Bárbara D'Oeste	Desenvolvimento Integrado do Produto	Antonio Álvaro de Assis Moura; Joselir Rodrigues Henriques; Klaus Schützer	Digital Mockup; Integração Fornecedor/Cliente; Interdependências entre Fom Features; Modelamento Baseado em Fom Features; Normas STEP (ISO 10303); Tecnologia de	Via o desenvolvimento de sistemas computacionais que suportem o desenvolvimento integrado do produto ao longo de todo o ciclo de vida. A integração dos sistemas CAD, CAPP, CAM e CNC de tal forma que todas as informações do produto possam estar representadas e um modelo único e digital sendo representado e gerenciado por sistemas PDM/PLM. O modelo do produto em desenvolvimento é em XML, baseado no AP214-STEP, permitindo a integração do ciclo de desenvolvimento com internet browser.
18	CAD		2006	Reinaldo Francisco de Azeite	reinaldo@aboo.co.br	Engenharias; Engenharia Mecânica	Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ	Colégio Técnico de Engenharia	Departamento de Mecânica	Juiz de Fora	Sistemas de Manufatura	Eliane Barao Friedrich; João de Moraes Vieira	CAD/CAM; Integração de sistemas; Fluxo de dados; SOLIDWORKS	Investigar a geração de aplicações estratégicas e/ou específicas de sistemas integrados de fabricação, interface CAD/CAM, simuladores UNICAM....
19	CAD	http://www.unifor.br	2002	Francisco Elcivaldo Lima	franciscollima@unifor.br	Engenharias; Engenharia Mecânica	Universidade de Fortaleza - UNIFOR		Departamento de Manufatura e Qualidade	Fortaleza	Prototipagem	Francisco Elcivaldo Lima	Náutica; Prototipagem	
20	CAD	www.pucrs.br/~isaac/GFCIM.htm	2003	Isaac Newton Lima da Silva	isaac@pq.cnpq.br	Engenharias; Engenharia Mecânica	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS	Faculdade de Engenharia	Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica	Porto Alegre	Pesquisa em CNC	José Rui Barbosa	CAE; CAM; CNC	Desenvolver atividades utilizando tecnologia para automação da manufatura através do uso de softwares CAE/CAD/CAM e CNC

Apêndice IV - Universidades estrangeiras com laboratórios de Prototipagem e Fabricação Digitais para arquitetura

			Aditivas			Subtrativas			Corte		
	UNIVERSIDADE	DEPARTAMENTO	SLA	FDM Printer	3D Printer	CNC Router	Modela Miller	Denford Miller	LASER	VINIL	Jato d'água
Estados Unidos	Clemson University	School of Architecture – Digital Design Shop			Z-Corp	Techno-Isel			Universal Laser systems		
	Columbia University	GSAPP – Graduate School of Architecture, Planning and Preservation				Techno-Isel					Oxman
	University of California – Berkeley	CAD/CAM Lab		Stratasys	Z-Corp				Universal Laser systems		
	Ball State University	I-Made				marca não informada			marca não informada		
	MIT	Digital Design Fabrication Group		Stratasys	Z-Corp	Techno-Isel	Roland DG Corporation	Denford	Universal Laser systems	Roland DG Corporation	Oxman
	Harvard	Graduate School of Design			Z-Corp	Techno-Isel			Universal Laser systems		
	Penn State University	Department of Architecture			Z-Corp						
	University of Texas at Austin	Design Fabrication			Z-Corp	Techno-Isel			Universal Laser systems		
Portugal	Instituto Superior Técnico de Lisboa	DeCivil		Stratasys			Roland DG Corporation		Universal Laser systems	Roland DG Corporation	
Holanda	TU Delft	Architecture (CAM-lab)			marca não informada	marca não informada	marca não informada		marca não informada		
Suíça	Zurich Federal Institute of Technology	Raplab – Rapid Architectural Prototyping Laboratory			Z-Corp	Techno-Isel			Universal Laser systems		
Áustria	University of applied Arts Vienna	School of Architecture				General Laser			General Laser		
Espanha	International University of Catalunya	ESARQ				Techno-Isel					
Japão	The Hong Kong Polytechnic University	Rapid Product Development Resource Centre	3D Systems	Stratasys							
Chile	Chile Río de Janeiro Catholic University	School of Architecture and Urban Design			Stratasys	Techno-Isel			Accuris		
Brasil	State University of São Paulo in Campinas	School of Civil Engineering, Architecture and Urban Design			Z-Corp				Universal Laser systems		
	Rio de Janeiro Catholic University	School of Architecture and Design				Techno-Isel					

Apêndice V - Trabalhos de Iniciação Científica desenvolvidos no LAPAC

Título: Maquetes táteis: infográficos tridimensionais para a orientação espacial de deficientes visuais Aluno: Luis Fernando Milan Bolsa: CNPq Orientação: Prof. Gabriela Celani	
Descrição: Esta pesquisa teve como objetivo estudar a maneira como os ambientes e suas configurações são apreendidos pelo cego, possibilitando, assim, a sugestão de novo método que possa auxiliá-lo no estabelecimento de uma relação mais eficiente e segura com o ambiente construído. Como produto, foram produzidas maquetes táteis para os deficientes visuais que utilizam a biblioteca central da UNICAMP, com a utilização de técnicas de prototipagem rápida.	
Título: O método projetual de Andrea Palladio: uma implementação em VBA Aluna: Bianca Tiemi Kubagawa Bolsa: SAE Orientação: Prof. Gabriela Celani	
Descrição: Esta pesquisa teve como objetivo estudar os aspectos algorítmicos do método projetual do arquiteto Andrea Palladio. Na primeira etapa foram analisadas algumas implementações computacionais desenvolvidas a partir de sua obra I Quattro Libri dell'Architettura. Em seguida, foi realizado um estudo dos diferentes métodos de cálculo das proporções e tipos de tetos dos cômodos descritos no primeiro livro dos Quattro Libri dell'Architettura. Finalmente, foi desenvolvido um aplicativo para AutoCAD em VBA que permite a geração automatizada de representações tridimensionais de todas as combinações possíveis de comprimento, pé-direito e forma do teto para uma dada largura de cômodo. A partir desses modelos foram criadas maquetes físicas por meio de impressão 3D. A pesquisa permitiu que se aprofundassem simultaneamente os conhecimentos sobre Palladio e sobre a geração automatizada da forma com os meios digitais.	

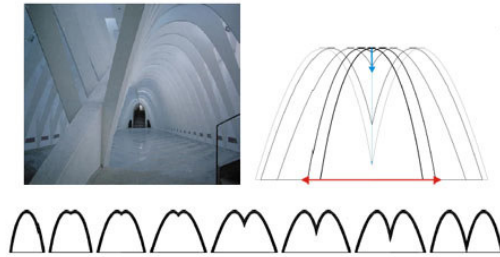
Título:

A Parametrização e o uso das transformações geométricas na obra de Santiago Calatrava

Aluno: Guilherme Stroeder Martins

Bolsa: CNPq

Orientação: Prof. Gabriela Celani



Descrição: A pesquisa teve como objetivo o estudo da repetição paramétrica de formas na obra do arquiteto espanhol Santiago Calatrava. Foram realizadas inicialmente pesquisas bibliográficas sobre o arquiteto e sobre os diferentes tipos de transformações geométricas. Em seguida, foram selecionadas duas obras do arquiteto representativas dessas transformações, a estação de Lyon e o centro comunitário de Alcoy, para as quais foram criados modelos geométricos e maquetes simplificadas, com o uso de técnicas de prototipagem rápida (impressão 3D e gravação a laser respectivamente). O objetivo desses modelos é permitir uma melhor compreensão dos conceitos compositivos presentes nas duas obras.

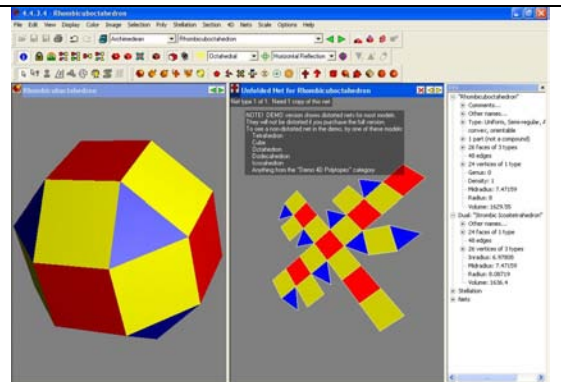
Título:

Maquetes de papel com o uso de cortadora a laser

Aluna: Juliana Ritsuko Matsubara

Bolsa: FAPESP

Orientação: Prof. Gabriela Celani



Descrição: Esta pesquisa consiste em estudar a confecção de maquetes arquitetônicas em papel, com o uso de cortadora a laser, dando continuidade à pesquisa de iniciação científica realizada anteriormente pela aluna. Este estudo é dividido em três etapas: (1) pesquisa bibliográfica e de materiais; (2) pesquisa e teste de programas de computador que automatizam o processo de conversão de um modelo 3D para um modelo planificado pronto para cortar; (3) produção de maquetes de alguns edifícios usando papel cortado a laser. Como resultado, será produzido um novo manual de confecção de maquetes em papel com o uso de cortadora a laser, com a descrição do processo e recomendações para o uso adequado do equipamento.

Título:

A prototipagem rápida no processo de produção de maquetes de arquitetura

Aluna: Beatriz Carra Bertho

Bolsa: FAPESP

Orientação: Prof. Gabriela Celani



Descrição: Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver uma metodologia de confecção de maquetes arquitetônicas em diferentes escalas com técnicas de fabricação digital. Para isso, foram produzidas maquetes de diferentes tipos e escalas com as duas máquinas disponíveis no LAPAC, uma cortadora a laser (X-660 Universal Laser Systems), e uma impressora 3D (Printer 310Plus). O projeto Museum for African Art, do arquiteto Bernard Tschumi foi escolhido como estudo de caso. Foram analisadas capacidades, limitações e vantagens de cada método em relação a tempo, dificuldade da produção, uso dos materiais, custo, nível de precisão e qualidade do modelo. Como resultado, foi produzido um manual com recomendações.

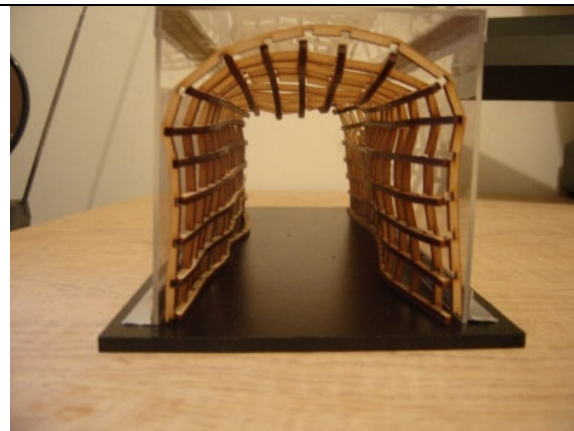
Título:

O uso de técnicas de animação digital no processo de projeto

Aluno: Eduardo Marotti Corradi

Bolsa: CNPq

Orientação: Prof. Gabriela Celani



Descrição: Esta pesquisa tem por objetivo estudar a animação como ferramenta no desenvolvimento de projetos arquitetônicos. Para isso primeiramente foi necessário entender como a animação se conecta com o campo arquitetônico, aparentemente, duas atividades distintas. Foi realizado um levantamento sobre publicações sobre esse tema, assim como projetos arquitetônicos desenvolvidos com a ajuda de ferramentas de animação. Pretende-se desenvolver agora um projeto arquitetônico utilizando algumas técnicas de animação. Optou-se por um projeto com um programa simples e de pequenas proporções por se tratar de um estudo experimental: um pequeno pavilhão. Pretende-se utilizar técnicas de prototipagem rápida na confecção das maquetes e de fabricação digital na confecção de um protótipo de parte da estrutura.

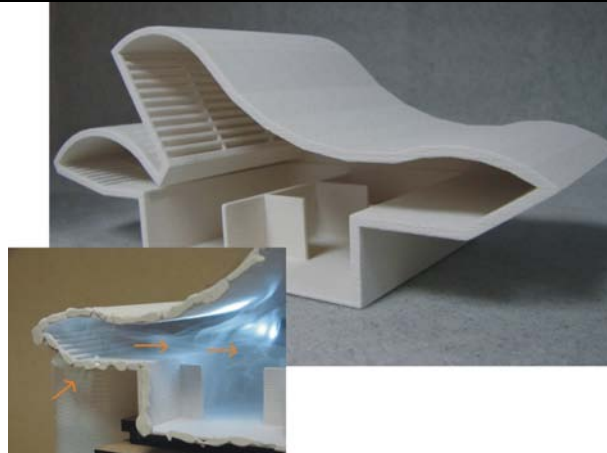
Título:

Estudo da ventilação natural em edifícios com o uso de túnel de vento e de maquetes confeccionadas por prototipagem rápida

Aluna: Carolina Ansensio Oliva

Bolsa: SAE

Orientação: Prof. Gabriela Celani



Descrição: Na primeira etapa desta pesquisa foram pesquisados mecanismos de ventilação passiva em edifícios. A seguir, uma maquete de parte do prédio do Hospital Sarah do Rio de Janeiro, do arquiteto João Filgueiras Lima (Lelé) foi produzida para ilustrar um desses mecanismos, com o auxílio de técnicas de prototipagem rápida. Os testes foram feitos no LAPAC com o uso de gelo seco, de um compressor de ar e de um aspirador de alta potência simulando um túnel de vento, de maneira a obter dados qualitativos e material ilustrativo sobre o funcionamento do sistema escolhido.

Título:

A digitalização 3D para prototipagem rápida: um estudo de caso de engenharia reversa

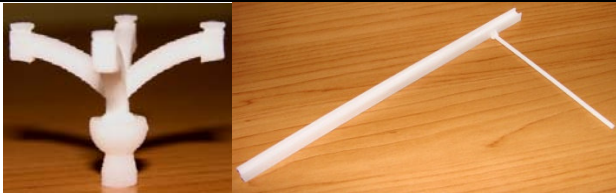
Aluna: Laura Cancherini

Bolsa: CNPq

Orientação: Prof. Gabriela Celani

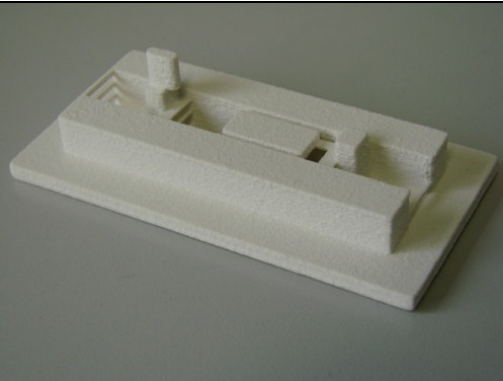


Descrição: Esta pesquisa faz parte de um projeto em desenvolvimento LAPAC, que visa produzir uma maquete para as salas do acervo permanente da Pinacoteca do Estado. Na presente pesquisa serão testados e avaliados três diferentes métodos de digitalização de objetos 3D, com o objetivo de digitalizar as 100 esculturas do acervo permanente da Pinacoteca. Os modelos geométricos digitais assim obtidos deverão ser tratados em programas gráficos e impressos na impressora 3D. Estima-se que a metodologia de digitalização/impressão 3D a ser desenvolvida neste estudo também poderá ser aplicada à área de Arquitetura e Engenharia Civil, por exemplo na engenharia reversa de peças construtivas.

Título: Prototipagem rápida no processo de produção digital de edificações Aluna: Tarsila Bonaldo Bolsa: Fapesp Orientação: Prof. Denis Granja	
Descrição: Este trabalho relata um estudo exploratório sobre as potencialidades do uso de maquetes produzidas por prototipagem rápida (PR) durante o processo de produção de edifícios, em especial no caso de detalhes construtivos complexos, que possam apresentar dificuldades em termos de comunicação entre os diferentes participantes desse processo (projetistas, empreiteiros, mestre de obras e a indústria de componentes construtivos). Para isso, foi selecionado um projeto de edifício desenvolvido por arquiteto de renome internacional que apresentava detalhes complexos. O projeto publicado, no qual este estudo se baseou, apresentava um nível de detalhamento semelhante ao dos projetos que uma construtora costuma receber ao iniciar o processo de construção de um edifício. A partir do material gráfico disponível, foi realizado o detalhamento dos componentes construtivos e a produção de modelos físicos em escala reduzida por meio de técnicas de PR. O resultado certamente contribuirá para que o produto final tenha maior conformidade com o idealizado em projeto, servindo como um vínculo integrado entre projeto e execução de edificações.	

Apêndice VI - Trabalhos de extensão à comunidade desenvolvidos no LAPAC

Título: Desenvolvimento de maquetes de um laboratório de prospecção de petróleo Alunas: Ana Emilia S. Claudino e Joyce Carvalho Bolsa: SAE Orientação: Prof. Gabriela Celani	
Descrição: Este projeto, realizado por solicitação do Depto. de Eng. de Petróleo da FEM-UNICAMP, tem como objetivo produzir três maquetes que serão utilizadas pela equipe multidisciplinar que desenvolve um projeto de laboratório de prospecção de petróleo em grandes profundidades. O projeto resultará nos seguintes produtos: maquete de um tanque de provas em escala 1:25; maquete do laboratório, em escala 1:50; e maquete de implantação do laboratório, em escala 1:100. Serão utilizadas técnicas de Fabricação Digital disponíveis no LAPAC. Além disso, está sendo desenvolvido um projeto de circuladores para instalação nas maquetes, em diversas escalas e impressos em 3DP no LAPAC.	
Título: Desenvolvimento de maquetes para a coleção permanente da Pinacoteca do Estado Alunas: Ana Emilia S. Claudino e Joyce Carvalho Bolsa: SAE Orientação: Prof. Gabriela Celani	
Descrição: O objetivo deste projeto é produzir maquetes das salas do segundo pavimento da Pinacoteca do Estado, onde o acervo permanente do museu é exposto. As maquetes estão sendo produzidas com técnicas de prototipagem rápida em escala 1:25 e serão utilizadas pela equipe de curadores da Pinacoteca durante o desenvolvimento de um novo layout da exposição desse acervo. A reprodução do acervo, quadros e esculturas, também faz parte desse projeto.	

Título: Desenvolvimento de uma maquete para o campus da UNICAMP Aluna: Juliana Ritsuko Matsubara Bolsa: PAPI Orientação: Prof. Gabriela Celani	
Descrição: Este projeto, realizado por solicitação da prefeitura do campus da UNICAMP, prevê a confecção de uma maquete do campus Zeferino Vaz em escala 1:2.000, com o uso de técnicas de prototipagem rápida. A base topográfica da maquete foi produzida com placas de laminado melamínico cortadas na cortadora a laser do LAPAC. Os edifícios do campus foram modelados em AutoCAD e impressos na impressora SLS do CenPRA (Centro de Pesquisas Renato Archer). Como resultado, pretende-se desenvolver uma metodologia para a confecção de maquetes de grandes áreas urbanas com equipamentos de prototipagem rápida. A maquete produzida, em fase de finalização, ficará exposta na Biblioteca Central da UNICAMP.	
Título: Desenvolvimento de uma maquete para o prédio do Instituto de GeoCiências (IG) da UNICAMP Aluno: Thiago Roso Bolsa: SAE Orientação: Prof. Gabriela Celani	
Descrição: Este projeto, proposto pelo professor e arquiteto Dácio Ottoni (Ottoni Arquitetos Associados) tem como objetivo o desenvolvimento de maquetes que deverão explicar detalhes construtivos à equipe de empreiteiros responsável pela construção do novo prédio do Instituto de Geociências da UNICAMP. O arquiteto possui preocupações com relação à correta execução dos detalhes construtivos, que contribuirão para a qualidade da obra. Contudo, sabe-se que muitas vezes os desenhos bidimensionais são demasiadamente abstratos para serem compreendidos corretamente. Espera-se desenvolver neste projeto uma metodologia de produção de maquetes de detalhes que poderá ser aproveitada posteriormente em outras situações, incluindo o ensino de detalhamento construtivo para arquitetos e engenheiros civis.	

Apêndice VII - Pesquisa com alunos do TFG

Alunos:

Luis Fernando Milan

Mariana Ramos

Maria Julia Mazetto

Izabela Maciel

1. Durante as assessorias de projeto, a maquete foi importante para o seu desenvolvimento?

Luis Fernando Milan: A maquete foi interessante sim no desenvolvimento, principalmente em função de alguns detalhes topográficos do terreno que não são facilmente percebidos em planta e em relação à forma da estrutura de cobertura, que em desenho técnico também fica difícil de demonstrar. Na apresentação da idéia pela primeira vez, a maquete foi essencial para que o projeto fosse percebido como um todo pelos orientadores. Depois disso, apesar de não ter realizado diversas maquetes, ela sempre foi um meio de discussão dos aspectos construtivos da estrutura e de relação de alguns elementos do projeto.

Mariana Ramos: Muito! Eu escolhi um conceito que para mim era importante expressá-lo tanto na horizontal (na forma das minhas praças e na tipologia do meu hotel), quanto na vertical (na parte fechada, em um balanço envidraçado e nos rasgos do meu prédio). Tenho muita facilidade em me expressar em 2D, mas para explicar o que acontece paralelamente na minha planta e na minha elevação eu precisei da maquete física em todas as etapas das minhas assessorias.

Maria Julia Mazetto: Sim. A maquete me ajudou muito a expor minhas idéias ao orientador e vice-versa. A visualização e os estudos de volumetria ficam muito mais claros na presença da maquete.

Izabela Maciel: Sim, os estudos volumétricos foram muito importantes para o andamento do projeto. Fiz estudos em poliuretano expandido, um material muito bom para este tipo de uso.

2. A maquete foi importante na apresentação do trabalho à banca examinadora?

Luis Fernando Milan: No caso da banca, foi possível visualizar melhor o conjunto do projeto, que por ser extenso e envolver ambientes diferenciados é conectado pela estrutura de cobertura.

Mariana Ramos: Muito! As diferenças de nível das praças e as gradações do conceito na fachada só foram possíveis de serem entendidas realmente quando a banca viu minha maquete. Na mão eu não teria sido capaz de cortá-la e por desenhos não seria tão imediata a compreensão da volumetria. Eu não consigo modelar meus

pensamentos em 3D no computador. O problema é esse. E o que eu modelo eu não consigo avaliar na tela o quanto estou progredindo. Me demanda um tempo enorme. Mas essa é uma dificuldade minha. Por outro lado, eu sou muito ágil para desenhar em 2D. E quando eu uso a cortadora a laser face a face para montá-las depois, somente de desenhar as faces já entendo coisas sobre meu projeto que não teria pensado se estivesse focada em desenhar minha apresentação somente. Desenhar para cortar a laser e montar em seguida faz parte do meu processo de estudo da volumetria, não é apenas o meio para conseguir a maquete a ser estudada. Algumas pessoas conseguem isso extrudando e cortando volumes em 3D no cad. Eu descobri que isso é possível só quando tive a necessidade de pensar meu projeto dessa maneira prática para usar a cortadora a laser.

Maria Julia Mazetto: Sim. Como o meu projeto tem muitos níveis, a relação entre eles ficou mais clara à banca observando a maquete.

Izabela Maciel: Sim, facilita o entendimento pela visualização tridimensional.

3. As técnicas disponíveis no LAPAC (Impressora 3D e Corte a laser) são suficientes para suprir as suas necessidades como aluno de TFG?

Luis Fernando Milan: Acho que são suficientes sim. No meu caso, trabalho basicamente com planos. Então utilizei apenas a cortadora a laser e foi suficiente na construção da maquete, não sendo necessária qualquer outra ferramenta. Apenas cortei todas as peças na máquina e coleí. Inclusive os volumes dos edifícios existentes, foram feitos na cortadora e dobrados, com detalhes que não seriam possíveis de representar se fossem feitos à mão.

Mariana Ramos: Não há nada que eu sinta carência no uso da cortadora a laser. Como tenho muita dificuldade de pensar em 3D, a impressora 3D não seria útil para mim. A cortadora a laser me permite pensar em 3D a partir do 2D que é meu forte.

Maria Julia Mazetto: No meu caso foi sim. A cortadora a laser foi crucial na confecção da maquete. Sem ela, acho que seria impossível chegar ao mesmo resultado, com a qualidade alcançada.

Izabela Maciel: As técnicas são muito boas e fiz uso da cortadora. No entanto, senti necessidade de um scanner 3D. Creio que esta é uma ferramenta muito importante, pois, em alguns projetos com formas mais indefinidas e ângulos diferentes de 90, fazemos estudos volumétricos em materiais mais plásticos e em seguida precisamos digitalizá-los. É um grande desafio alcançar a modelagem exata, principalmente usando AutoCAD. Isto seria facilitado pelo scanner 3D, ou um equipamento semelhante.

4. A maioria dos alunos usou a cortadora a laser para a execução das maquetes. Você acha que o resultado teria sido diferente se as

maquetes fossem executadas à mão?

Luis Fernando Milan: Completamente diferente. A precisão da cortadora e a facilidade de manuseio incentivam a inserção de detalhes que fazem toda a diferença na representação da maquete e no entendimento do projeto. No meu caso, os pórticos e as fitas da cobertura encaixaram perfeitamente, sem que fosse necessária qualquer adequação. Se fosse feito à mão, com certeza os elementos não teriam se encaixado logo no primeiro corte. Além de ajudar nos detalhes, isso contribui para a redução do tempo gasto na produção da maquete.

Mariana Ramos: Eu sequer teria chegado nessa conclusão de projeto se tivesse que executá-la a mão. Primeiro porque a maquete fez parte de todo meu processo criativo, segundo porque eu costumava limitar meu projeto ao que eu sabia que era capaz de realizar artesanalmente. E acredite: não era muito.

Maria Julia Mazetto: Sim. A qualidade das maquetes melhorou muito com a cortadora a laser.

Izabela Maciel: Com certeza. A cortadora nos possibilita um ganho enorme de tempo. Por isto a qualidade das maquetes está melhorando cada vez mais. Se fossem feitas à mão, não teriam tantos detalhes, nem o acabamento primoroso que permite a cortadora a laser.

5. O que você achou da qualidade geral das maquetes nas últimas entregas?

Luis Fernando Milan: Excelentes e bastante completas, com detalhes de brises e esquadrias em diversos casos, ainda que em pequenas escalas.

Mariana Ramos: Acho que esteve muito acima da dos últimos anos. A riqueza de detalhes, precisão e informações de projeto que foram possíveis ilustrar esse ano com o uso das técnicas disponíveis do LAPAC eu posso dizer com certeza que mudaram a maneira como se pensa o projeto em todas as suas etapas. Ao menos no TFG. Valorizou-se uma forma de apresentação que devido ao longo tempo para execução artesanal era deixada de lado nas apresentações de projeto. A maquete era remetida a algum ponto da nota que era desprezível perto da necessidade de concluir a apresentação do projeto em si. Agora, as técnicas disponíveis no LAPAC dão a possibilidade da maquete ser a própria apresentação do projeto, e as pranchas serem um apoio a ela.

Maria Julia Mazetto: O resultado foi muito bom, melhor que todos os anos anteriores.

Izabela Maciel: Muito boa, como nunca visto anteriormente. Parecem maquetes profissionais. Os materiais também estão se diversificando e dão efeitos muito bonitos plasticamente.

Apêndice VIII* - Questionário de finalização dos workshops - Técnicas de fabricação digital para a confecção de maquetes arquitetônicas

Perfil

() Aluno

() Professor

Curso / ano

Formação e matérias que leciona

Sobre a Prototipagem Rápida (PR):

1. Você:
 - () Nunca tinha ouvido falar
 - () Já tinha ouvido falar mas nunca utilizou
 - () Já tinha utilizado e/ou feito algum curso
2. Acredita na sua utilização para arquitetura?
 - () Sim () Não
 - () Depende de quando for utilizada
3. Em que (ou quais) fase(s) do processo de projeto você acha que a PR é mais indicada?
 - () Estudo de viabilidade
 - () Estudo preliminar
 - () Ante-projeto
 - () Detalhamento executivo
 - () Apresentação para o cliente
 - () Apresentação em concursos
4. Quais as principais limitações que você vê na utilização destas tecnologias?
 - Corte a laser
 - 3DPrinter (impressão com gesso)
 - FDM (impressão com plástico derretido)

Sobre o Mini-curso:

1. A carga horária foi
 - () Suficiente
 - () Insuficiente
 - () Excessiva
2. A didática utilizada foi adequada?
 - () Sim () Não

Por que?
3. As técnicas de PR e suas aplicações foram apresentadas de maneira suficientemente clara e concisa?
 - () Sim () Não

Por que?
4. A parte prática do mini-curso foi suficiente para o entendimento das técnicas abordadas?

() Sim () Não

Por que?

Sobre as técnicas utilizadas

1. Qual das duas técnicas disponíveis no LAPAC (3DP / Laser), na sua opinião, é a mais indicada para arquitetura?
2. Em que fase do processo de projeto você acha que as seguintes técnicas são mais apropriadas?
 - Corte a laser
 - 3DPrinter (impressão com gesso)
 - FDM (impressão com plástico derretido)

Sobre a PR no ensino de projeto

1. Você acredita que a PR pode ser um fator importante no ensino de projeto em cursos de arquitetura?
() Sim () Não
Por que?
2. Em que fase do currículo de arquitetura a PR deveria ser inserida?
() Início do curso
() Final do curso
() outro
Por que?
3. Em que disciplinas do currículo de arquitetura a PR poderia ser útil?
4. Em que etapas do desenvolvimento de uma disciplina de projeto os alunos deveriam utilizar as técnicas de PR? Por que?
5. Se você pudesse ter acesso a uma máquina de prototipagem rápida hoje, qual seria o tipo e o uso que daria a ela?

Comentários:

Obrigada pela atenção,

Regiane Trevisan Pupo

Doutoranda do Programa de Pós-Graduação

FEC – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

* NOTA: O termo “Prototipagem rápida” foi utilizado nos questionários para se referir às tecnologias de corte a laser e impressão 3D (3DPrinter), visto que foram aplicados antes das definições estabelecidas.

Apêndice IX

Questionário de finalização dos workshops

Quais as principais limitações que você vê na utilização destas tecnologias?

Corte a laser

- Em materiais com espessura maior, como no nosso caso a chapa de acrílico de 6mm, a máquina demora muito tempo para cortar, já que o acrílico com essa espessura derrete mas se funde novamente.
- Restrição com relação a ortogonalidade do raio laser em relação ao plano de corte (para os encaixes de canto, por exemplo)
- No caso do papel madeira algumas áreas ficaram chamuscadas.
- Não vejo limitações
- quando o material possui uma espessura significativa não suportada pelo equipamento
- questão custo/ benefício relacionada a espessuras de chapas principalmente chapas metálicas para detalhes estruturais) que demandariam máquinas muito sofisticadas.
- Acesso à tecnologia importada, Locais dos prestadores de serviço, custo do serviço.
- depende do que se quer fazer, eu diria: bidimensionalidade do material, em alguns casos exige maior planejamento do projeto do protótipo
- Exige acabamento externo em determinados tipos de materiais, devido ao corte em alta temperatura.
- A falta de universalidade do equipamento; o que serve para cortar um tipo de material já não serve para cortar outro (no caso da joalheria então trabalhando com ouro e prata esse problema fica mais claro ainda).
- É última; só gera modelos ou protótipos formados por sólidos geométricos, limitando o processo criativo.
- Mantém necessidade de montagem
- Tamanho limitado da prancha (450 x 800mm) e capacidade de corte (adequada para cortar materiais com pouca espessura)
- Embora seja um equipamento versátil, a cortador laser apresenta limitações na reprodução de elementos de detalhe (como aqueles em relevo) ou superfícies curvas.
- Numa maquete mais complexa, a montagem do material cortado pode ser demais trabalhosa e demorada, servindo mais para estudos preliminares.
Tendo em mente que o corte a laser não inclui o processo de montagem. Acredito que para todo estudo feito nessa máquina deve-se ter atenção na montagem, ou seja, nos passos que serão tomados após o corte.
Outra limitação que deve ser questionada são os materiais utilizados. Apesar de ser bem versátil, a máquina corta diversos tipos de material, mas em alguns ela deixa marcas (por exemplo alguma queimadura) que prejudica no acabamento se o material estiver sendo direcionado para uma apresentação final.
- Modelagem de superfícies complexas (pós-processamento), perda do “realismo” da volumetria quando feito em “slices”;
- Considerando que o objetivo do corte a laser é facilitar o corte de superfícies (bi-dimensional), não consigo ver limitações para a função a ele atribuída. Otimiza o tempo de execução de qualquer maquete, finalidade a que nos atemos, possibilita corte / vinco, e o trabalho final fica muito bom.

- planificação dos volumes muitas vezes torna a “tridimensionalização” do modelo trabalhosa e / ou complexa por apresentar muitas partes pequenas
- Formas mais complexas
Acho essa tecnologia muito interessante. A gama de materiais que podem ser utilizados é bastante grande e tem mais fácil acesso. O único problema que eu vejo é pela própria complexidade dos projetos, que dificulta a montagem e pode ser necessário dividi-lo em partes pelas dimensões da máquina.
Não aceita materiais de maior espessura, permite vincos de um lado apenas, não aceita formatos de folha maiores.
- Embora esta máquina corte vários materiais, uma limitação desta tecnologia é a deficiência de não cortar alguns materiais resistentes como acrílico espesso e vidro, por exemplo. Outra limitação seria a marca de queimado que o laser deixa muitas vezes no material cortado, deixando-o “feio” para ser utilizado numa apresentação, por exemplo.
- O problema do aquecimento do material. dependendo da espessura, são necessárias potências maiores e/ou maior numero de passadas, o que acaba queimando o material. O tamanho não deixa de ser um fator limitante, embora para a maioria das peças seja suficiente.
- Nenhuma. É a maquina dos meus sonhos.
- A produção de formas complexas, topológicas.
- Não vejo limitações relevantes.
- Disponibilidade para uso. Alguns tipos de materiais que não podem ser cortados nesta máquina
- Não vejo nenhuma limitação na técnica de corte a laser, ao menos para tudo que precisei até o momento foi muito bem executado pela cortadora.
- produto final em 2D.
- Pode causar desperdício de material se não for feito um planejamento adequado de corte. Isto pode levar um tempo até o aluno perceber os macetes para “encaixar” as peças da melhor forma numa única placa de material.
- Montagem da maquete 3D, pois esta não corta grandes objetos volumétricos, mas acho que a maior prática neste tipo de tecnologia é para o corte de materiais mais chapados
- É difícil de usar para modelar formas mais orgânicas.
- Acho que a dimensão da mesa é o único fator limitante já que pode-se usar diversos materiais para corte.
- Não vejo muitas limitações. É um aparelho simples de se usar, e auxilia muito na construção de modelos e maquetes.
- Na execução de formas tridimensionais exige ainda grande participação humana na montagem de formas planificadas ou colagem de camadas.
- O grau de dificuldade e de detalhamento da maquete desejada.
- alguns materiais não são indicados
- Dificuldade na montagem de estruturas delgadas e ou com muitas curvas. Estou me referindo à junção Pepakura/corte a laser.
- Acho que a única limitação é em relação ao material que se pode usar nessa máquina
- Trabalho na montagem das peças – habilidade manual
- O processo de corte a laser, apesar de preciso e dinâmico, é apenas parte de um processo mais completo de confecção de modelo 3d.
- Montagem da maquete exige muito tempo

3DPrinter (impressão com gesso)

- A técnica atualmente exige muito tempo e dinheiro para execução, além de necessitar de arquivos com modelamentos bem trabalhados, o que dificulta seu uso em estudos preliminares.
- dificuldade e incompatibilidade entre os softwares de modelamento (rhino, autocad, sketch up)
- Custo do material
- Material muito caro
- a definição da superfície não permite que se faça detalhes mais minuciosos e delicados
- A questão da fragilidade do material para manuseio e nível de acabamento, se for um peça com escala muito reduzida
- Acesso à tecnologia importada, Locais dos prestadores de serviço, custo da matéria prima e do serviço, propriedades mecânicas do material.
- fragilidade do material gesso
- Fragilidade do Modelo gerado, elevado custo de produção e aquisição dos sistemas.
- Superfície porosa dos modelos, fragilidade
- Foi o método mais interessante, mas os protótipos possuem uma escala reduzida demais
- Trabalho de retirada do gesso ainda tem caráter artesanal.
- Qualidade do acabamento do gesso é bastante inferior a outros materiais mais apropriados, porém, os outros materiais ainda apresentam um custo muito elevado para serem utilizados nas fases iniciais de um projeto comum. Viáveis, a meu ver, mais para empreendimentos de grande porte. Porém, acredito que o preço tenta a baixar a médio prazo!
- Não permite experimentações em série, dado a velocidade de impressão, custo do material e fragilidade das maquetes
- Custo e relativa fragilidade das peças
- Em primeiro lugar, deve-se lembrar que há um limite para dimensões do protótipo final, ou seja, de qualquer forma a maquete não poderá ser muito grande, o que acarreta na obrigação de se trabalhar em certas escalas.
Em segundo lugar, deve-se sempre lembrar que o material, além de ser caro, tem limitações de resistência. Ou seja, elementos esbeltos não poderão ser trabalhados na 3Dprinter sem alguns cuidados necessários.
- Tamanho limitado (o que interfere na proporção da maquete, ex: relação entre tamanho do pilar X volume externo), Alto Custo;
- A impossibilidade de fazer impressões coloridas é uma limitação. Seria interessante que, mesmo obtendo um resultado homogêneo, pudéssemos pigmentar o pó.
- a impressora 3D não está disponível para uso de alunos de graduação da UNICAMP, além do valor elevado dos produtos necessários para a impressão (pó e líquido)
- Protótipos mais resistentes
O preço do material, que impede que se use com liberdade. Caso isso não seja problema, acredito que um fator de limitação físico na máquina é o tamanho da área de impressão, não sendo possível fazer maquetes muito grandes.
- Alto custo, retirada do gesso após o término é demorada, delicada e faz bastante sujeira.
- A principal limitação dessa tecnologia é não fazer a impressão de peças esbeltas, pois o material utilizado não oferece muita resistência. Outro fator é a limitação do tamanho do

protótipo a ser impressa (a máquina possui limites um pouco pequenos para a prototipação), embora isso seja viável devido ao elevado custo do material a ser utilizado.

- O Custo e a limitação de tamanho. Peças muito pequenas podem não trazer o resultado desejado perante um leigo.
- Fragilidade nos detalhes
- Escala e grande produtividade.
- Custo do material, imprecisão quando detalhamento de peça muito pequena (exemplo a maquete da treliça mostrada em aula).
- A utilização da modelagem em Autocad apenas, uma vez que hoje há diversos outros programas em que se pode modelar. O acesso ao material, que é caro.
- De princípio achava a técnica de FDM muito mais interessante, porém quando vi os resultados da treliça feito na 3Dprinter e na FDM, mudei um pouco de opinião, creio que cada uma tem o seu uso específico e atinge qualidades melhores dependendo do modelo que for impresso. Pareceu-me que os modelos feitos com esta técnica, no entanto, são frágeis.
- Imprime objetos relativamente pequenos
- o alto custo pode gerar outras limitações, como, por exemplo, o uso desse tipo de técnica somente para maquetes pequenas. Isto pode acontecer, porque, muitas vezes, o aluno opta por imprimir objetos pequenos que exija pouco material, sendo que o interessante é construir maquetes grandes, já que ela permite um nível bom de detalhamento.
- Impossibilidade de de bom detalhamento, pois me parece que ela é mais utilizada para produzir maquetes de conteúdo volumétrico.
- Alto custo, fragilidade do modelo
- O custo é muito alto e o acabamento não é dos melhores.
- Acho que a única limitação deva ser o custo do material e da máquina
- Pouco resistente. Limitações na espessura dos componentes.
- Fragilidade da peça quando terminada e custo
- tempo de execução do processo.
- dependendo da forma do objeto não é conveniente esse processo de adição. Mas, acredito que no geral é o que oferece menor grau de limitação. Custo razoável, acabamento do modelo é bastante interessante. No entanto, formas muito delgadas e com grandes balanços são mais difíceis de impressão. No geral, acredito ser o que permite maiores possibilidades de adequação às diferentes formas projetáveis. É possível imprimir grande variedade de formas. Até cortes do objeto são possíveis de serem realizados. No eixo X e no eixo Y.
- O valor de todos os materiais. Com o gesso, como vimos em aula, podemos fazer muitas variações de modelos e espessuras (não tão finas).
- Dimensão, custo
- Pelo visto, salvo engano, é possível utilizar o processo para qualquer demanda de modelo 3d. Fica apenas a impressão da sujeira gerada no processo, contornável porém com certa paciência.
- Custo do material