

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO**

LARISSA MILIOLI

**O USO DE SISTEMAS CAD E DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA NO
PROJETO DE ARQUITETURA: BENEFÍCIOS E DESAFIOS**

**Brasília
2012**

LARISSA MILIOLI

**O USO DE SISTEMAS CAD E DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA NO
PROJETO DE ARQUITETURA: BENEFÍCIOS E DESAFIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Neander Furtado Silva

Brasília

2012

LARISSA MILIOLI

**O USO DE SISTEMAS CAD E DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA NO
PROJETO DE ARQUITETURA: BENEFÍCIOS E DESAFIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Brasília, 20 de novembro de 2012.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Neander Furtado Silva
Orientador – FAU/UnB

Prof. Dr. David Rodney Lionel Pennington
FaC/UnB

Prof. Dr. Marcos Thadeu Queiroz Magalhães
FAU/UnB

*Dedico este trabalho aos meus filhos,
Enzo e Thiago, minhas grandes inspirações.*

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial ao meu marido Sandro, por respeitar e apoiar minhas escolhas. Ao professor e orientador Neander Furtado Silva pela oportunidade de estudar um assunto inovador e fascinante, conjuntamente com a dedicação de Ecilamar Lima. A todos que me apoiaram e contribuíram para a realização deste trabalho, em especial aos amigos Adriana Kinoshita, Aldo Berndt, Igor Monteiro, Juliana Sell, Ludmila Andrade, Maria Lúcia Francalacci, Paola Ferrari e Talita Córdova. Acima de tudo, a Deus, *Soli Deo Gloria*.

RESUMO

Neste trabalho de mestrado desenvolvemos um estudo sobre a aplicação de diferentes tipos de sistemas de projeto auxiliado por computador (CAD) e de prototipagem rápida no processo de projeção arquitetônica. Nosso objetivo foi o de avaliar como ocorre a transferência de informação dos elementos geométricos entre estes sistemas e como as dificuldades de interoperabilidade entre os mesmos podem afetar a fidedignidade dos modelos físicos gerados a partir dos modelos virtuais originais. Por isto elaboramos a hipótese que afirma que o uso de diferentes tipos de sistemas CAD e de prototipagem rápida resulta em diferentes níveis de sucesso na transferência de informações entre os mesmos, devido ao grau de precisão de cada sistema. Apesar do variado grau de precisão, estes sistemas produzem modelos físicos digitais com a representação satisfatória em relação ao modelo virtual original, portanto sem necessidade de retrabalho. A partir da realização de seis experimentos elaboramos uma análise comparativa entre os aspectos formais resultantes da modelagem e da prototipagem de um mesmo projeto arquitetônico em diferentes tipos de sistemas CAD: Revit, AutoCAD e FormZ. Os modelos CAD foram importados pelos *softwares* de prototipagem rápida ReplicatorG da Makerbot e Zprint da ZCorporation para serem produzidos por suas respectivas impressoras tridimensionais, pelo processo de adição de camadas. Os resultados obtidos a partir da experimentação foram avaliados em duas etapas: a primeira constatou que é possível obter a interoperabilidade integral das geometrias do modelo entre os diferentes sistemas CAD e os diferentes *softwares* de prototipagem rápida utilizados. A segunda etapa demonstrou que os sistemas apresentam diferentes graus de precisão, observados principalmente no momento de importação e reprodução das superfícies curvas e complexas do modelo. Ao final desta dissertação, sugerimos um conjunto de recomendações para facilitar a utilização destas ferramentas digitais por parte dos arquitetos, para que as mesmas contribuam agilizando e tornando mais precisas as tomadas de decisão, durante o processo de projeção. Reduz-se, assim, a probabilidade de retrabalho do modelo virtual original, após sua importação por meio dos sistemas de prototipagem rápida.

Palavras-chave: Sistemas CAD. Prototipagem Rápida. Interoperabilidade. Projeto de Arquitetura.

ABSTRACT

In this Master research work we develop a study about the application of different types of computer aided design (CAD) and rapid prototyping systems in the process of architectural design. Our goal is to assess how the transfer of geometric elements information between these systems occurs and also the difficulties of interoperability between them can affect the reliability of physical models generated from the original virtual models. Therefore we developed the hypothesis that the use of different types of CAD and rapid prototyping systems results in different levels of successful transfer of information between them, due to the accuracy of each system. Although the varied degree of precision, these systems produce digital physicals models with the satisfactory representation in relation to the original virtual model, so there is no need for rework. Upon completion of six experiments we performed a comparative analysis of the resulting formal aspects of modeling and prototyping of the same architectural design in different CAD systems: Revit, AutoCAD and FormZ. The CAD models were imported by the software for rapid prototyping of ReplicatorG MakerBot and Zprint of ZCorporation to be produced by their respective three-dimensional printers, in the process of adding layers. The results from the trial were evaluated in two stages: the first one found it possible to achieve full interoperability of the model geometry between different CAD systems and different software used for rapid prototyping. The second stage showed that the systems have varying degrees of precision, mainly observed at the time of importing and reproduction of curved and complex surfaces model. At the end of this Dissertation, we suggest a set of recommendations in order to make it easier for the architects to use these digital tools, so that the same ones may contribute to accelerate it and also, to make it possible for these professionals to get more accuracy, when making up their minds, during the entire process. Thus, the need to rework the proposed model after importing it to the rapid prototyping systems is reduced.

Keywords: CAD Systems. Rapid Prototyping. Interoperability. Architectural Design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo virtual e protótipo rápido, projeto Ópera, Walter Mourão, 2º semestre 2010.....	18
Figura 2 - Modelo virtual e protótipo rápido, projeto Museu, Bianca Ilha, 1º semestre 2011	18
Figura 3 - Desenho em Papiro, Egito, Dinastia XVIII.....	25
Figura 4 - Elevação do Palácio de Sansedoni, 1340, arquiteto Giovanni di Agostino	27
Figura 5 - Representação de sólido em é pura	29
Figura 6 - O Crystal Palace, Londres (1851), Joseph Paxton	31
Figura 7 - Escola Bauhaus, arquiteto Walter Gropius, Dessau, Alemanha, 1926 ...	32
Figura 8 - O papel integrador do modelo digital	34
Figura 9 - Mapeamento proposto por Lawson.....	36
Figura 10 - À esquerda projeto urbano, The pick, Hong Kong, 1982; à direita Estádio Al Whada, em Abu Dhabi, 1988, Zaha Hadid.....	39
Figura 11 - (a) Croquis; (b) e (c) Pinturas; (d) e (e) Fotos da obra da estação de trem, em Strasbourg, França (2001), Zaha Hadid.....	42
Figura 12 - Museu Nacional de Arte do Século 21, Roma, Zaha Hadid, 2009	44
Figura 13 - Pavilhão <i>Chanel Mobile Art</i> , Hong Kong, Tóquio, Nova York, Zaha Hadid, 2010	44
Figura 14 - Imagens do modelo virtual, Museu de Guggenheim em Taichung, Zaha Hadid, 2006.....	45
Figura 15 - Fotos do Modelo Prototipado, Museu de Guggenheim em Taichung, Zaha Hadid, 2006.....	45
Figura 16 - Modelagem B-Rep e Modelagem CSG.....	48
Figura 17 - O processo de digitalização do modelo físico, no escritório de Frank Gehry	52
Figura 18 - Mecanismo Jacquard de 1804, no Musée des arts et métiers, França ...	56
Figura 19 - A Escultura do Peixe, Frank Gehry, Barcelona, 1992	57
Figura 20 - Processos de fabricação digital: (a) Conformação e (b) Corte.....	58
Figura 21 - Processos de fabricação digital: (c) Subtração e (d) Adição	59
Figura 22 - Pavilhão " <i>Dynaform</i> " da BMW, Bernhard Franken, Frankfurt, 2001.....	61

Figura 23 - (a) Impressora 3D, modelo ZPrinter 310 Plus, da Z Corporation; (b) Impressora 3D RapMan 3.1 Ultimate, da 3D Systems	67
Figura 24 - (a) Equipamento de estereolitografia (SLA); (b) Sinterização seletiva a laser (SLS); (c) Equipamento de modelagem de objeto laminado (LOM); (d) Modelagem por deposição e fusão (FDM)	70
Figura 25 - Fases do processo de prototipagem rápida por adição de camadas	71
Figura 26 - Protótipo rápido do projeto do Edifício de Artes Dramáticas e Mídia Eletrônica do Instituto Politécnico de Rensselaer, Morphosis, EUA.....	75
Figura 27 - Representação da normal e dos vértices de cada triângulo no arquivo STL em ASCII	82
Figura 28 - Estrutura de um arquivo STL em ASCII	82
Figura 29 - Estrutura de um arquivo STL binário.....	83
Figura 30 - Exemplo de rachadura (<i>crack</i>): (a) superfície lisa; (b) superfície representada por faces planas; (c) superfície com faces planas corrigidas	85
Figura 31 - Exemplos de: a) Orientação inconsistente da normal; b) Objeto com normais trocadas;.....	86
Figura 32 - Exemplos de geometria duplicada: a) Cubo com um lado triangulado e desviado;.....	86
Figura 33 - Exemplo de Erros de Cavidade. a) Superfície original (traçado vermelho)	86
Figura 34 - Local do terreno do experimento (@-15.841028,-47.897456)	95
Figura 35 - Fotos do processo de fabricação na impressora ZCorporation.....	120
Figura 36 - Fotos do processo de fabricação na impressora Thing-O-Matic da MakerBot.....	120
Figura 37 - Fotos do processo de limpeza do protótipo na impressora Zprinter.....	121
Figura 38 - Fotos dos equipamentos de prototipagem rápida do LFDC	122

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo esquemático da problemática	19
Quadro 2 - Resumo esquemático da evolução das ferramentas de representação na arquitetura	35
Quadro 3 - Campos de utilização de prototipagem rápida e fabricação digital	63
Quadro 4 - Comparações entre os tipos de prototipagem digital	72
Quadro 5 - Comparações entre prototipagem rápida (PR), modelo virtual (MV) e às etapas de modelagem convencional	73
Quadro 6 - Etapas gerais do processo de prototipagem rápida por adição de camadas.....	75
Quadro 7 - Fases do método de investigação.....	88
Quadro 8 - Especificações técnicas da impressora ZPrinter 310 plus monocromática	93
Quadro 9 - Especificações técnicas da impressora Thing-O-Matic	94
Quadro 10 - Comparação entre os resultados da Fase 1 e da Fase 2 (Modelo AZ)	112
Quadro 11 - Comparação entre os resultados da Fase 1 e da Fase 2 (Modelo BZ)	113
Quadro 12 - Comparação entre os resultados da Fase 1 e da Fase 2 (Modelo CZ)	114
Quadro 13 - Comparação entre os resultados da Fase 1 e da Fase 2 (Modelo AX)	115
Quadro 14 - Comparação entre os resultados da Fase 1 e da Fase 2 (Modelo BX)	116
Quadro 15 - Comparação entre os resultados da Fase 1 e da Fase 2 (Modelo CX)	117
Quadro 16 - Tamanho dos arquivos dos modelos CAD, STL e número de faces... ..	118
Quadro 17 - Tempo e material gasto no processo de prototipagem dos experimentos	119
Quadro 18 - Comparação entre os resultados da Fase 1, Fase 2 e Fase 4 (Modelo AX)	124
Quadro 19 - Diferenças na representação do protótipo rápido AX (Thing-O-Matic) comparado ao modelo CAD A (Revit)	125

Quadro 20 - Comparação entre os resultados da Fase 1, Fase 2 e Fase 4 (Modelo AZ)	127
Quadro 21 - Diferença na representação do protótipo rápido AZ (Zprinter) comparado ao modelo CAD A (Revit)	128
Quadro 22 - Comparação entre os resultados da Fase 1, Fase 2 e Fase 4 (Modelo BX)	129
Quadro 23 - Diferenças na representação do protótipo rápido BX ((Thing-O-Matic) comparado ao modelo CAD B (AutoCAD)	130
Quadro 24 - Comparação entre os resultados da Fase 1, Fase 2 e Fase 4 (Modelo BZ)	132
Quadro 25 - Diferenças na representação do protótipo rápido BZ (Zprinter) comparado ao modelo CAD B (AutoCAD)	133
Quadro 26 - Comparação entre os resultados da Fase 1, Fase 2 e Fase 4 (Modelo CX)	134
Quadro 27 - Diferenças na representação do protótipo rápido CX (Thing-O-Matic) comparado ao modelo CAD C (FormZ).....	135
Quadro 28 - Comparação entre os resultados da Fase 1, Fase 2 e Fase 4 (Modelo CZ)	137
Quadro 29 - Diferenças na representação do protótipo rápido CZ (Zprinter) comparado ao modelo CAD C (FormZ).....	138
Quadro 30 - Comparação entre o resumo dos resultados do experimento (Modelo AX)	141
Quadro 31 - Comparação entre o resumo dos resultados do experimento (Modelo AZ)	142
Quadro 32 - Comparação entre o resumo dos resultados do experimento (Modelo BX)	143
Quadro 33 - Comparação entre o resumo dos resultados do experimento (Modelo BZ)	144
Quadro 34 - Comparação entre o resumo dos resultados do experimento (Modelo CX)	145
Quadro 35 - Comparação entre o resumo dos resultados do experimento (Modelo CZ)	146
Quadro 36 - Tamanho dos arquivos dos modelos CAD e STL e tempo total de fabricação.....	149

Quadro 37 - Recomendações gerais para modelagem em CAD e prototipagem rápida por adição.....	152
Quadro 38 - Recomendações específicas para modelagem em CAD e prototipagem rápida por adição.....	153

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três dimensões ou Tridimensional
3DP	<i>Tridimensional Printer</i> - Impressão ou impressora Tridimensional
AA	<i>Architectural Association - School of Architecture</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> - Código Padrão Americano para Intercâmbio de Informação
BIM	<i>Building Information Modeling</i> - Modelagem de Informação de Edificação
CAD	<i>Computer Aided Design</i> - Projeto Auxiliado por Computador
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> - Manufatura Auxiliada por Computador
CIS/2	<i>CIMSteel Integration Standards</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> - Controle Numérico Computadorizado
DWG	extensão de arquivo do <i>software</i> AutoCAD
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> - Modelagem por Deposição e Fusão
FMZ	extensão de arquivo do <i>software</i> FormZ
GCode	extensão de arquivo do <i>software</i> ReplicatorG
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
ISO	<i>International Standardization organization</i> - Organização Internacional de Padronização
KB	Kilobyte
LAPAC	Laboratório de Automação e Prototipagem Rápida para Arquitetura e Construção - UNICAMP
LFDC	Laboratório de Fabricação Digital e Customização em Massa - UnB
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> - Modelagem de Objeto Laminado
PR	Protótipo ou Prototipagem Rápida - <i>Rapid Prototyping or Prototype</i>
RVT	extensão de arquivo do <i>software</i> Revit
SLA	<i>Stereolithography</i> - Estereolitografia
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> - Sinterização Seletiva a Laser
STL	extensão de arquivo utilizado em sistemas de prototipagem rápida e fabricação digital
TIC	Tecnologia de Informação e Comunicação
ZBD	extensão de arquivo do <i>software</i> Zprint

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Problemática	15
1.2	Hipótese	20
1.3	Objetivos	21
1.4	Estrutura desta Dissertação.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	A evolução do processo de projeção arquitetônica.....	24
2.2	O processo digital de projeção arquitetônica.....	34
3	ESTUDO DE PRECEDENTE ZAHA HADID ARQUITETOS.....	38
3.1	O processo de projeto	39
3.2	O uso de ferramentas digitais.....	43
4	SISTEMAS CAD.....	47
4.1	Modelos CAD	51
4.2	Modelos BIM	53
5	SISTEMAS CAM	56
5.1	A prototipagem rápida	62
5.2	O modelo físico.....	64
5.3	O protótipo rápido.....	66
5.4	O processo de prototipagem rápida na arquitetura	74
6	INTEROPERABILIDADE	77
6.1	Tipos de formatos	78
6.2	O formato STL.....	80
6.3	A interoperabilidade CAD/CAM.....	83
6.4	A qualidade do modelo CAD	84
7	MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO	88
7.1	Equipamentos e <i>softwares</i> de sistemas CAD	90
7.2	Equipamentos e <i>softwares</i> de sistemas de prototipagem rápida.....	92
7.3	Descrição do método de investigação.....	94
7.3.1	Fase 1 (Modelagem no sistema CAD)	95
7.3.2	Fase 2 (Planejamento)	98
7.3.3	Fase 3 (Fabricação no sistema de prototipagem rápida).....	99
7.3.4	Fase 4 (Acabamento).....	100

8	EXPERIMENTAÇÃO	101
8.1	Fase 1 (Modelagem no sistema CAD)	101
8.1.1	Modelo CAD A (Revit)	102
8.1.2	Modelo CAD B (AutoCAD)	104
8.1.3	Modelo CAD C (FormZ)	107
8.2	Fase 2 (Planejamento)	108
8.2.1	Software Zprint	109
8.2.2	Software ReplicatorG	110
8.3	Fase 3 (Fabricação no sistema de prototipagem rápida)	118
8.4	Fase 4 (acabamento)	121
9	ANÁLISE DOS RESULTADOS	123
10	CONCLUSÃO	150
10.1	Desdobramentos Futuros	154
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155
	APÊNDICE A - DESENHOS DO PROJETO ARQUITETÔNICO DO MODELO DO EXPERIMENTO	162
	APÊNDICE B - VISTAS EXTERNAS RENDERIZADAS DOS MODELOS CAD	171
	APÊNDICE C - VISTAS EXTERNAS DOS MODELOS IMPORTADOS PARA PROTOTIPAGEM	177
	APÊNDICE D - FOTOS DOS PROTÓTIPOS RÁPIDOS	189
	APÊNDICE E - IMAGENS DOS ARQUIVOS STL DOS MODELOS CAD IMPORTADOS NO SOFTWARE FORMZ	201

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia digital, em constante evolução, apresenta ferramentas cada vez mais acessíveis em termos de interatividade e custo, para auxiliar nos processos de projeção, de fabricação digital de elementos arquitetônicos e de construção de edificações. Tais processos de projeto possuem condicionantes difíceis de atender, quando adotados os padrões tradicionais, ou seja, não digitais para representar e produzir principalmente as formas complexas. A evolução do processo e das ferramentas utilizadas para representação e produção da arquitetura, desde a antiguidade até os dias atuais são descritos na revisão bibliográfica.

A proposta desta pesquisa é estudar a aplicação de ferramentas digitais, como a modelagem virtual associada ao uso da prototipagem rápida, inseridas no contexto do processo de projeção arquitetônica e seus respectivos resultados. Os benefícios obtidos por arquitetos, com a apropriação de ferramentas computacionais para o desenvolvimento de projetos, podem ser observados em trabalhos de escritórios com referência internacional, alguns apresentados nesta pesquisa, por meio de abordagem e foco no processo de projeção.

Se, por um lado, existem vantagens potencializadas pelo uso associado das ferramentas de projeto e manufatura auxiliada por computador (CAD/CAM), como a redução do tempo de elaboração e maior precisão da representação do projeto; por outro, problemas como transmissão de dados da geometria do modelo podem ocorrer entre estes sistemas, produzindo modelos físicos diferentes dos modelos virtuais, em relação à intenção original do projetista.

A partir do entendimento da utilização da modelagem virtual e prototipagem rápida, pretende-se aumentar a capacidade de interoperabilidade, por meio de procedimentos preventivos e de configurações, além de enfatizar as diversas vantagens e benefícios dessas tecnologias adequadas no auxílio de todo o processo de projeção arquitetônica.

O objetivo específico desta dissertação é o de avaliar a capacidade de interoperabilidade entre os modelos virtuais gerados a partir de diferentes tipos de sistemas de projeto auxiliado por computador (CAD) e de sistemas de fabricação digital (CAM). De maneira que essas ferramentas possam ser utilizadas sem gerar retrabalho durante a produção do protótipo rápido, auxiliando desde o início do

processo de projeção, por representar de forma fidedigna as intenções do arquiteto.

Neste sentido, para poder propor os procedimentos necessários à redução dos problemas de interoperabilidade entre os sistemas, foi definido, para efeito de método de investigação, um mesmo projeto a ser modelado em três diferentes tipos de sistemas CAD (*Computer Aided Design*) e exportado para dois diferentes tipos de impressora tridimensional, com a intenção de obter o protótipo rápido idêntico ao modelo original virtual.

O processo de experimentação foi dividido em quatro fases, que inicia com a definição e modelagem do projeto, posteriormente a importação do modelo para o sistema de prototipagem, em sequência a fabricação do modelo físico digital e, por último, o acabamento do protótipo. Os resultados obtidos em cada fase possibilitam testar a hipótese deste trabalho.

Espera-se com este estudo contribuir efetivamente na redução de retrabalho na modelagem e no tempo para obtenção do protótipo digital, com o conseqüente aumento de tempo disponível para a experimentação do modelo gerado. Nesse aspecto, a prioridade não é apenas elaborar projetos em prazo reduzido, mas projetos de arquitetura melhores, principalmente quanto aos quesitos formais, funcionais e de desempenho estrutural e energético. Estes quesitos se apresentam como condicionantes fundamentais de uma edificação sustentável, que preconiza a redução do impacto ambiental que uma construção pode gerar, atendendo a uma demanda legal e atual de mercado.

1.1 Problemática

O arquiteto, quando ciente das possibilidades da fabricação digital, tem a expectativa de obter, diretamente do modelo virtual, o modelo físico de forma idêntica e automatizada, reduzindo o tempo de elaboração do projeto e garantindo precisão no produto final.

Além do caso estudado no presente trabalho, sobre Zaha Hadid, outros escritórios estrangeiros como Foster & Partners, Garafalo Architects e Gehry Associates, que adotaram o uso de modelagem digital e de prototipagem rápida no processo de projeção, apresentam resultados surpreendentes em termos de

qualidade e produtividade (PUPO, 2008, p. 11). Nos escritórios brasileiros, a prototipagem rápida raramente é utilizada no início do processo, e eventualmente visa à apresentação final de um projeto. Uma das razões apontadas por Celani e Bertho (2007) para a pouca utilização dessas ferramentas é a falta de conhecimento das suas técnicas.

Em termos gerais, a deficiência na formação de profissionais de arquitetura, no sentido de utilizar as ferramentas de fabricação digital, contribui para agravar a lentidão na incorporação destes recursos. Além da desinformação formal de tendências mais amplas de projeto, soma-se a desinformação tecnológica em relação ao uso dos programas de modelagem tridimensional digital (KOLAREVIC, 2003, p. 6).

A utilização da prototipagem rápida em projeto de arquitetura, em nosso país, ainda é incipiente. Em outras áreas, esta se concentra principalmente na produção de modelos para a engenharia mecânica, desenho industrial e paleontologia, além de contramoldes para fundição de próteses, utilizadas em cirurgias de reconstrução bucomaxilofacial e cranial. No caso de muitos escritórios de arquitetura americanos, europeus e asiáticos, a prototipagem rápida é utilizada desde as fases iniciais do processo de projeto (CELANI; BERTHO, 2007, p. 5).

É importante ressaltar que esses recursos vêm sendo utilizados desde a década 1980 pelas indústrias brasileiras de aeronaves e de automóveis. A partir do ano 2000, a fabricação suportada por sistemas digitais também tem apresentado aplicação em parte da indústria da construção civil no Brasil, como por exemplo, nas fábricas de estruturas de aço e de armações de metal (CUNHA, 2008, p. 70-91). Alguns dos exemplos nacionais de fabricação digital são o Memorial Darcy Ribeiro, do arquiteto João Filgueiras Lima, 2011 (DARCY, 2010, p.55-59), e os esferóides no memorial JK, do artista Darlan Rosa, 2002 (ROSA, 2011), ambos em Brasília, no Distrito Federal.

Nardelli e Vicent (2009) revelam como os escritórios de arquitetura paulistanos utilizam as tecnologias de informação e comunicação (TICs). A tecnologia digital é utilizada de maneira conservadora, praticamente em todas as etapas do processo de produção dos projetos, limitando-se à automatização de processos. A concepção do projeto, em praticamente 90%, ainda é desenvolvida por meio de croquis. O uso da prototipagem rápida CNC (*Computer Numeric Control*) tem sido aplicada em caso isolado (NARDELLI; VICENT, 2009).

O pouco uso da prototipagem rápida durante o processo de projeção arquitetônica pode estar relacionado ao fato da materialização do modelo virtual em protótipo rápido não ocorrer de forma direta e simples, entre outros fatos que não serão o foco desta pesquisa. No sentido de obter um protótipo rápido, inicialmente o modelo virtual produzido em *software* CAD tridimensional deve ser exportado para um programa CAM ou CNC. Este processo geralmente ocorre com o uso de arquivo no formato STL, para ser preparado e finalmente enviado para o maquinário que produz o modelo físico. Em raros casos, alguns *softwares* CAD como, por exemplo, o FormZ da AutoDesSys, exportam especificamente no formato nativo de determinado sistema CAM de destino, mas ainda assim problemas de tradução podem ser detectados.

Os autores Orciuoli e Celani (2010, p. 70) esclarecem que existem várias etapas a serem percorridas entre o modelo tridimensional virtual e o objeto físico fabricado:

A expressão “*file-to-factory*” (do arquivo à fábrica) esconde o fato de que o modelo virtual, precisa na maioria dos casos, ser corrigido, adaptado, preparado e transformado em código de máquina para que possa ser compreendido pelos equipamentos de fabricação digital.

Por sua vez, os arquitetos, por não conhecerem adequadamente esses equipamentos, acabam não tirando proveito de suas possibilidades. Como exemplo de problemas que podem ocorrer na impressão tridimensional de um modelo virtual, pode-se citar diferentes trabalhos de projeto final de graduação, desenvolvidos por dois alunos da FAU/UnB. Ambos utilizaram o mesmo *software* CAD tridimensional, o Rhinoceros 3D. A Figura 1 apresenta, à esquerda, a imagem do modelo virtual e, à direita, o Protótipo Rápido com falhas na fabricação digital, provavelmente devido à redução da escala do modelo. Por outro lado, a Figura 2 apresenta, à esquerda, uma imagem do modelo virtual e, à direita, o protótipo rápido com falhas na fabricação, provavelmente devido aos problemas de transferência de dados da geometria complexa do modelo virtual.

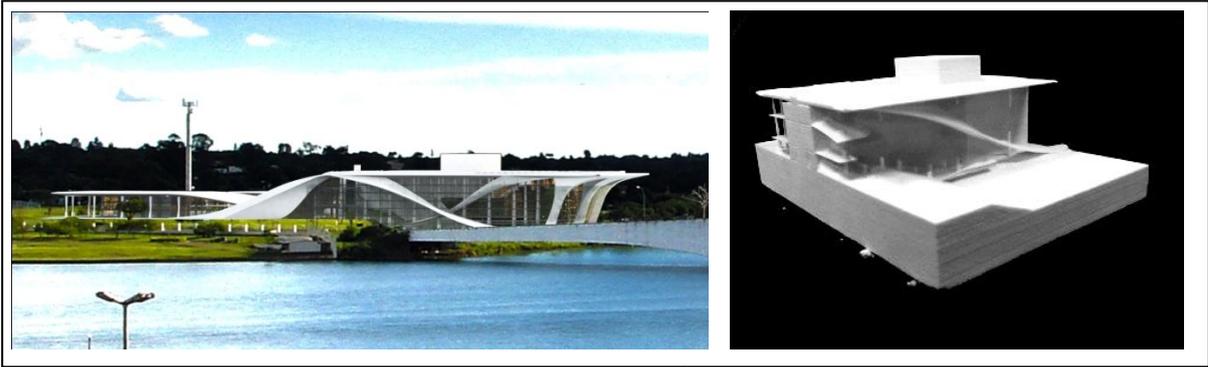


Figura 1 - Modelo virtual e protótipo rápido, projeto Ópera, Walter Mourão, 2º semestre 2010
Fonte: Arquivo pessoal

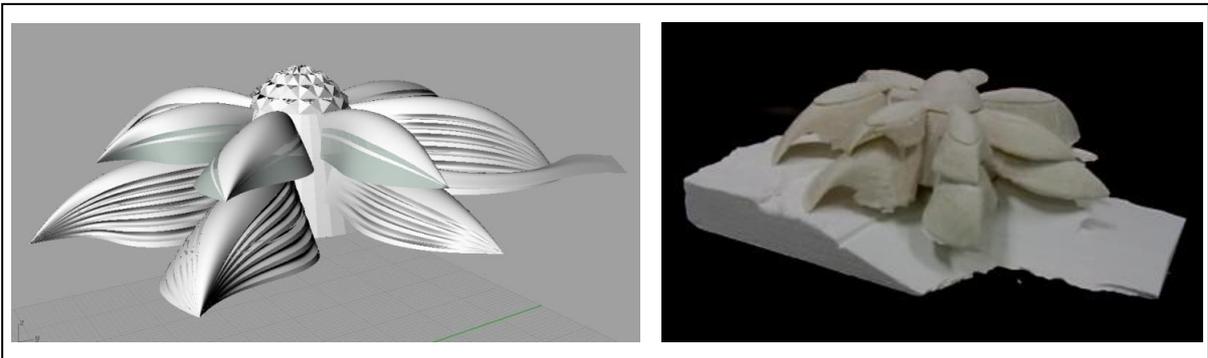


Figura 2 - Modelo virtual e protótipo rápido, projeto Museu, Bianca Ilha, 1º semestre 2011
Fonte: Arquivo pessoal

O modelo virtual, quando importado para o *software* de prototipagem rápida, pode apresentar problemas detectados pelo próprio programa de controle numérico, tais como erros na modelagem do projeto, inversão das normais de faces e sólidos mal formados, entre outros. Estes *softwares* de controle numérico, por sua vez, efetuam correções de forma automática, que podem gerar alterações na forma original do modelo. Alternativamente essas ferramentas permitem que o usuário faça as correções necessárias manualmente. Em outros casos, as correções são apenas possíveis retornando-se ao *software* de modelagem, o que requer retrabalho.

As causas de problemas no modelo virtual surgem quando os projetistas de CAD não entendem a aplicação dos requisitos geométricos e não têm uma maneira eficiente de validar os requisitos de modelagem, para identificar problemas potenciais. Nesse contexto, outra questão pode ser abordada, no que diz respeito à perda da intenção do projeto original na tentativa de efetuar o conserto da geometria em uma cópia do mesmo. Isto ocorre, porque as mudanças não são comunicadas de volta ao modelo original e características importantes do modelo são tratadas com correções equivocadas, muitas vezes simplificando a versão de cópia do modelo (McKENNEY, 1998, p.3).

Esses arquivos CAD com defeito podem causar ineficiência devida à perda de tempo e de produtividade, à perda da intenção do projeto e pela qualidade do produto final inferior ao projetado. Isto pôde ser constatado, no final da década de 1990, pela empresa americana ITI (*International TechneGroup Incorporated*) que verificou que até 70% dos homem/hora trabalhados foram desperdiçadas em correções de problemas de geometria no processo de prototipagem rápida (Ibid., p. 4).

Quadro 1 - Resumo esquemático da problemática



Fonte: Autoria nossa

O Quadro 1, acima, descreve de maneira esquemática o problema quando o arquiteto obtém o protótipo rápido de maneira diferente da representação formal comparada com a representação do modelo virtual original.

Portanto é necessário avaliar como ocorre a transferência de dados do modelo exportado pelo sistema CAD, para ser importado no sistema de prototipagem rápida, de forma que não venha ocorrer falhas na fabricação e consequentemente retrabalho do modelo.

Considerando-se a revisão bibliográfica e o contexto atual do processo de projeção, utilizando modelagem virtual e prototipagem rápida em arquitetura, as questões específicas da presente pesquisa foram assim definidas:

Como é feita a exportação dos modelos virtuais para os *softwares* de prototipagem rápida?

Quais os problemas que podem ser identificados no momento da fabricação de um modelo virtual, por meio do uso de sistemas de prototipagem rápida? Qual a origem destes problemas?

Como os problemas, detectados no momento em que o modelo é importado pelo sistema de prototipagem rápida, podem ser resolvidos?

Quais os tipos de retrabalho no modelo virtual, necessários para a efetivação do protótipo rápido?

Todas as informações necessárias do modelo virtual são exportadas para resultar em modelos físicos gerados digitalmente com fidedignidade?

1.2 Hipótese

Algumas considerações devem ser feitas, como apresentam os exemplos anteriores das Figuras 1 e 2, para que se possa estabelecer a hipótese desta Dissertação, as quais sugerem a existência de problemas sistêmicos de interoperabilidade no uso das ferramentas de prototipagem rápida, para a fabricação do modelo do projeto arquitetônico.

Neste contexto, os recursos oferecidos pelos *softwares* de sistemas CAD de modelagem parecem não oferecer capacidade de transferência de informações da geometria do modelo de maneira adequada, ou ainda, os *softwares* de sistemas de prototipagem não conseguem importar todas as informações para representar o modelo virtual original.

Portanto, a interoperabilidade entre os *softwares* de modelagem virtual e os de prototipagem rápida, quando realizada de forma integral, contribui positivamente para a rapidez e o aumento da qualidade da fabricação do modelo físico, além de possibilitar uma melhor tomada de decisão, desde o início do processo de projeção arquitetônica. Assim, o presente trabalho de dissertação baseia-se na seguinte hipótese:

- O uso de diferentes tipos de sistemas CAD e de prototipagem rápida resulta em diferentes níveis de sucesso na transferência de informações entre os mesmos, devido ao grau de precisão de cada sistema. Apesar do variado grau de precisão, estes sistemas produzem modelos físicos digitais com a

representação satisfatória em relação ao modelo virtual original, portanto sem necessidade de retrabalho.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como proposta estudar a aplicação da modelagem virtual e prototipagem rápida, durante o processo de projeção da arquitetura, e os seus respectivos resultados. Nesta pesquisa, tais recursos são considerados centrais no desenvolvimento desse processo, ao invés de serem usados apenas para a representação final do projeto de arquitetura.

O objetivo específico é o de avaliar a capacidade de interoperabilidade integral entre diferentes sistemas CAD e sistemas de prototipagem, e verificar se há necessidade de retrabalho, para obter o aspecto formal do protótipo rápido o mais próximo possível do modelo virtual original.

A intenção é a de realizar, por meio de experimentos, um diagnóstico e produzir um conjunto de recomendações, de como pode funcionar a interoperabilidade entre diferentes sistemas CAD de modelagem virtual e diferentes sistemas de prototipagem rápida, de maneira a obter-se um resultado satisfatório com os recursos digitais atualmente existentes.

1.4 Estrutura desta Dissertação

Esta Dissertação está estruturada nos seguintes capítulos: o primeiro contém a introdução, que apresenta o tema desta pesquisa, e a problemática que trata das possíveis dificuldades de interoperabilidade entre os sistemas CAD e de prototipagem rápida. Em seguida, apresentamos a hipótese e os objetivos que norteiam esta pesquisa.

O segundo capítulo compreende uma revisão bibliográfica. Em sua primeira parte apresenta a evolução do processo de projeção arquitetônica, desde a antiguidade até os dias atuais. O foco são os tipos de ferramentas utilizadas para representação, o papel do profissional da arquitetura e conseqüentemente o produto resultante. A segunda parte relata o processo digital de projeção arquitetônica,

destacando as ferramentas computacionais mais conhecidas na atualidade. Além disto, informa como ocorre o processo de projeto no contexto arquitetônico, destacando o diferencial decorrente do uso das ferramentas digitais.

No terceiro capítulo descrevemos a título de estudo de precedente, o processo de desenvolvimento dos projetos da arquiteta Zaha Hadid e sua equipe e a incorporação das ferramentas digitais.

No quarto capítulo apresentamos os conceitos dos sistemas CAD, observando a sua evolução histórica, suas características e vantagens como ferramentas de auxílio na projeção arquitetônica.

No quinto capítulo descrevemos os sistemas CAM, a viabilização do seu uso na construção civil, os tipos de fabricação digital, os resultados decorrentes da mudança de paradigma da padronização para customização em massa.

Ainda neste capítulo, relatamos a diferença entre os termos prototipagem rápida e fabricação digital, as diferenças entre o modelo físico e o protótipo rápido e as características dos diferentes tipos de equipamentos utilizados nestes processos. Em seguida, descrevemos como o processo de prototipagem rápida, dividido em fases distintas, pode ser utilizado como recurso de projeto na arquitetura. Apresentamos ainda exemplo de escritórios que utilizam essas ferramentas digitais no *atelier* de projeto.

No sexto capítulo discorreremos sobre interoperabilidade, os tipos de formatos conhecidos para transferência de dados, particularmente o formato STL, que apresentamos com mais detalhes. Por fim, descrevemos como acontece a interoperabilidade entre os sistemas CAD/CAM e os tipos de problemas que podem ocorrer quando os utilizamos.

No sétimo capítulo apresentamos o método de investigação elaborado para testar a hipótese desta Dissertação. A seguir elaboramos um roteiro de como deve ser conduzido o teste de nossa hipótese, o qual é dividido em quatro fases distintas: Fase 1 (modelagem no sistema CAD), Fase 2 (planejamento), Fase 3 (fabricação no sistema de prototipagem rápida) e Fase 4 (acabamento). No mesmo capítulo definimos a maneira pela qual devem ser avaliados os resultados de cada uma destas fases, em duas etapas. A primeira testa a integralidade da transferência das geometrias do modelo do sistema CAD para o sistema de prototipagem rápida, examinando os resultados obtidos e comparando-os entre a Fase 1 e a Fase 2. A segunda etapa testa a precisão, em termos de resolução, das geometrias do

modelo, comparando os resultados obtidos nas Fases 1, 2 e 4. Os equipamentos e *softwares* dos sistemas CAD e de prototipagem rápida adotados para realizar os experimentos são apresentados com suas especificações técnicas, características e o motivo de escolha dos mesmos.

No oitavo capítulo, apresentamos os resultados da experimentação, realizada conforme o método de investigação proposto. Apresenta os seis experimentos, as especificações de cada uma das quatro fases citadas no capítulo anterior.

No nono capítulo os resultados obtidos em cada experimento são organizados e apresentados em quadros para análise.

No décimo capítulo, denominado conclusão, ressaltamos os resultados obtidos em resposta à nossa hipótese do trabalho. Tecemos considerações sobre a mudança de expectativa a respeito dos aparentes problemas de interoperabilidade sistêmica. Elaboramos, a partir da observação de nossos experimentos, uma lista de recomendações para o arquiteto utilizar as ferramentas CAD/CAM, no intuito de reduzir-se o retrabalho no modelo.

O último capítulo, décimo primeiro, contém os desdobramentos futuros que sugerem a continuação desta pesquisa, no sentido de adotar o mesmo projeto arquitetônico utilizado no experimento desta Dissertação e desenvolver a etapa executiva final do mesmo.

Nesta Dissertação, o apêndice A contém os desenhos técnicos do projeto arquitetônico elaborado na etapa inicial. O apêndice B apresenta as imagens das vistas externas dos modelos CAD. O apêndice C ilustra as imagens dos modelos importados nos *softwares* dos sistemas de prototipagem. O apêndice D contém as fotos dos protótipos rápidos. Por último, o apêndice E apresenta as imagens dos arquivos formato STL dos modelos CAD importados no *software* FormZ.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A evolução do processo de projeção arquitetônica

Ao longo do tempo, a evolução do processo de representação da arquitetura nos revela a busca de recursos apropriados, por parte dos arquitetos, para registrar e transmitir suas idéias a terceiros, de maneira mais próxima possível da sua intenção original. Dessa forma, a representação das idéias de projeto e a comunicação das mesmas encontram-se associadas aos esforços desses profissionais para a execução de suas propostas, marcando historicamente a profissão de arquiteto.

Desde a antiguidade, o elaborador da obra arquitetônica usava os recursos da fala, da escrita e dos desenhos como formas de representação de suas idéias. Ao final da idade média, os serviços dos arquitetos eram solicitados pelo Estado, pela Igreja, classes mais ricas, órgãos administrativos, entre outros. Por isso, os arquitetos eram associados com os ricos e poderosos, e as suas funções requeriam o conhecimento dos conceitos e a prática da construção. A maioria dos arquitetos eram administradores e responsáveis não apenas pela concepção, mas pela supervisão e apresentação de todos os grandes projetos públicos. Esses profissionais recebiam os títulos de "mestre construtor" e "supervisor de obras" (KOSTOF, 1977, p.3-6).

No Egito, a produção das edificações era baseada na combinação de desenhos e modelos físicos, feitos com cordas e estacas. Os restos de fragmentos de desenhos daquela época fornecem algumas informações sobre os usos dos mesmos na arquitetura, por meio de planos quadriculados, imagens pitorescas de edifício e até mesmo esboços de planos de apartamento. Esse material era utilizado como guia de trabalho pelos mestres de obras (ROBBINS, 1997, p. 10).

Um caso famoso pode ser visto em um dos raros desenhos de papiro ainda existentes, Figura 3, oriundos do Egito e datados provavelmente da Dinastia XVIII, mostrando as elevações frontais e laterais de um santuário. As vistas em perspectivas, como nós as conhecemos na atualidade, ainda não existiam. A grade quadrada, sobreposta ao desenho, pode ter servido para controlar a proporção da estrutura interior do projeto (KOSTOF, 1977, p. 8-9).

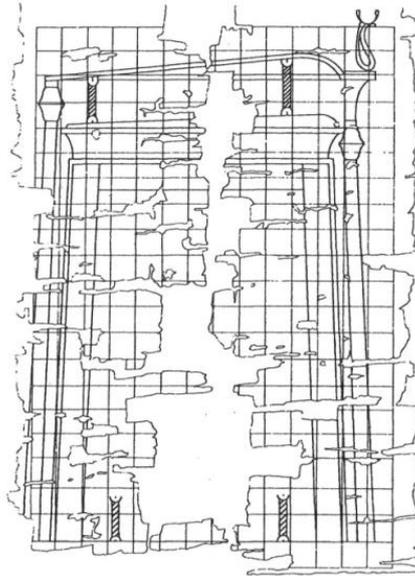


Figura 3 - Desenho em Papiro, Egito, Dinastia XVIII

Fonte: Kostof, 1977, p. 8

Na história, o desenho é citado como um dos recursos utilizados para registrar e auxiliar na execução dos trabalhos manuais mais elaborados, como aqueles relatados em textos bíblicos do Antigo Testamento, escritos por volta de 1.500 A.C. Aquelas instruções foram transmitidas a Moisés no monte Sinai, com a finalidade de possibilitar a construção do Tabernáculo - uma estrutura que pudesse ser transportada com facilidade pela tribo dos Levitas, por quarenta anos de peregrinação no deserto:

[...] e para elaborar desenhos e trabalhar em ouro, em prata, em bronze, e para lapidação de pedras de engaste, e para entalhe de madeira, e para toda a sorte de lavoires. Também lhe dispôs o coração para ensinar a outrem, a ele e a Aoliabe, filho de Aisamaque, da tribo de Dã. Encheu-os de habilidade, para fazerem toda a obra de mestre, até a mais engenhosa, e a do bordador em estofa azul, em púrpura, em carmesim e em linho fino, e a do tecelão, sim, toda a sorte de obra, e a elaborar desenhos. (Êxodo, 35:32-35, 2008, p. 128)

Na passagem bíblica acima, observa-se que foi preciso ganhar habilidades intelectuais e manuais para elaborar desenhos, e para aplicá-las a materiais como o couro, prata, ouro, bronze, pedras, madeiras, etc. Estas habilidades, uma vez adquiridas, também eram ensinadas a outros. O desenho era necessário para realizar tanto os trabalhos manuais quanto a obra.

Por sua vez, na arquitetura grega, o termo “architekton” significava mestre construtor, ao invés de mestre-projetista, e também era usado para se referir aos

carpinteiros e aos construtores de templos. O agente central da arte da arquitetura grega era o pedreiro, que trabalhava a partir de detalhadas descrições verbais estabelecidas pelo arquiteto, geralmente referidas como "*syngraphai*". Entretanto, Kostof argumenta que o desenho deve ter sido uma parte da prática da arquitetura grega, por ser extremamente difícil de conseguir o detalhamento de uma elevação, sem a existência de recursos de representação (KOSTOF, 1977, p. 11-12).

Por outro lado, na arquitetura romana, o plano e a elevação, que Vitruvius chamava de perspectiva, foram amplamente utilizados pelos arquitetos e contratantes em suas interações (VITRÚVIO apud ROBBINS, 1997, p. 11). No entanto, independente do papel do desenho na arquitetura antiga, esse ainda não era um instrumento dominante de projeto, nem tinha libertado os arquitetos das suas responsabilidades de ofício, dentre outras, de estar presente na obra. O desenho nesta época foi uma entre outras técnicas que os arquitetos utilizaram, nas construções sob suas responsabilidades.

Na Idade Média, os desenhos foram utilizados nos projetos góticos para levantar recursos financeiros, facilitar a escolha entre os vários modelos possíveis, viabilizar a construção de edificações ou mesmo para convencer o contratante e as autoridades a investirem nas mesmas. O mestre construtor, por assim dizer, ou o arquiteto daquela época, acumulava as atribuições dos atuais arquitetos, engenheiros, construtores e supervisores de obra da Idade Moderna. Entretanto, os seus desenhos ainda não eram instrumentos adequados para orientar os pedreiros nos processos técnicos de construção (ROBBINS, 1997, p. 12).

Por volta de 1340, ainda no período Gótico, a fachada do palácio Sansedoni em Siena foi elaborada pelo arquiteto Giovanni di Agostino (Figura 4). Quando descoberto por Franklin Toker, aquele desenho também conhecido como Elevação de Sansedoni apresenta muito das características do desenho arquitetônico moderno. Segundo Robbins (Ibid., p. 13), a representação da fachada é ortogonal, desenhada em escala, fornece medições dimensionais e é acompanhada com descrições por escrito, para orientar a sua realização.

Este novo tipo de representação, com mais informações, tornou-se um elemento crucial na definição de um novo estatuto para o arquiteto, como gerador do projeto, e para informar ao construtor as dimensões do edifício.

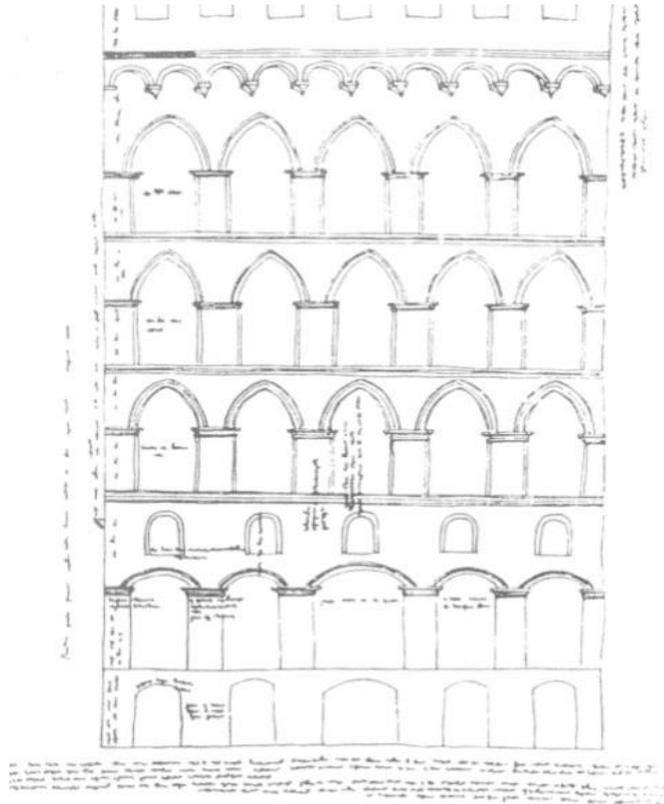


Figura 4 - Elevação do Palácio de Sansedoni, 1340, arquiteto Giovanni di Agostino
 Fonte: Robbins, 1997, p. 14

No final da Idade Média foi desenvolvido o desenho de fachadas, plantas baixas e cortes, para transmitir instruções aos construtores. Este tipo de representação reunia basicamente as criações da imaginação ao material arquitetônico.

Ainda segundo Robbins (Ibid., p.10-14), a combinação dos desenhos do mesmo padrão da Elevação Sansedoni, incluindo o contrato escrito, proporcionou uma nova relação com os projetos. Permitiu aos arquitetos trabalharem fora do local da obra e desenvolverem mais de um projeto ao mesmo tempo.

O desenho seria utilizado, então, para separar o arquiteto daqueles que executavam o projeto no canteiro de obras, de maneira a comunicar claramente o que os arquitetos queriam transmitir, sem a necessidade de permanência no local da obra.

Esta última transformação do arquiteto, de artesão em artista, foi acompanhada e, sem dúvida, tornada possível pela nova centralidade e importância do desenho como um instrumento crítico da criação de arquitetura e de produção. (Ibid., p. 10, tradução nossa).

Desde o Renascimento, o desenho tem sido utilizado como um instrumento que permite testar ideias, sem a necessidade de colocá-las em prática *in loco*. A partir daquele período, o desenho seria usado como uma forma de memória arquitetônica, uma maneira de comunicá-la e reproduzi-la em textos impressos, ressaltando dessa forma a importância de utilização de modelo.

O desenho, na Renascença, permitiu que os arquitetos fossem mais artísticos, para expressar o tom, o estilo e os materiais, bem como a medida de um edifício em um meio de representação em que ambos, arquitetos e leigos, poderiam se comunicar. As novas maneiras de representação gráfica, como a perspectiva e seções analíticas e elevações, somaram significativamente ao método pelo qual o desenho era entendido, e ao modo por meio do qual o projeto era criado (Ibid., p.13-19).

O desenho também estava começando, por meio da elevação Sansedoni, a assumir uma nova importância como um instrumento aparentemente autônomo no processo de concepção e projeto arquitetônico. Esta separação de concepção entre a realização e cada um dos atores associados, no seu tempo, tornaria possível - com a invenção dos tipos de desenhos ainda mais precisos - um novo discurso arquitetônico. (Ibid., p. 16, tradução nossa).

Robbins escolheu o tema desenho como a questão central de sua abordagem, e relacionou a utilização dos mesmos com a transformação da prática da arquitetura ao longo da história. Descreveu como o aumento de técnicas de precisão dos desenhos, em relação à ideia original do arquiteto, constitui o elemento principal de evolução do processo de representação do projeto - ainda que de forma limitada, pois não representa o espaço a ser construído, mas apenas suas dimensões e parcialmente as formas de uma edificação. Nesse sentido, Zevi (2009, p. 18) pontua tal questão:

Mas a arquitetura não provém de um conjunto de larguras, comprimentos e alturas dos elementos construtivos que encerram o espaço, mas precisamente do vazio, do espaço encerrado, do espaço interior em que os homens andam e vivem.

As inovações na prática arquitetônica, realizadas a partir do Renascimento, período em que o desenho passou a ser o instrumento dominante do projeto, permitiram que o arquiteto se afastasse do local da obra, o que, por sua vez, não o isentou de problemas no momento da execução do projeto.

A dificuldade de entendimento do projeto bidimensional, constituído pelas plantas baixas, cortes e fachadas, por parte de quem o executa, assim como a maneira como deve ser construído, pode resultar em alterações no projeto original, geralmente acarretando em aumento de tempo e de custo para a sua execução.

Deve-se adicionar a essas consequências negativas, decorrentes da dificuldade de entendimento do projeto arquitetônico, a frustração do arquiteto e do cliente sobre suas expectativas em relação ao produto final, semelhantemente ao que Manetti relata na biografia de Brunelleschi (apud ROBBINS, 1997, p. 17). Enquanto este último estava fora, as suas orientações gráficas foram deliberadamente ignoradas, não foram transmitidas aos trabalhadores da obra do hospital a ser construído em Florença, resultando em um edifício de qualidade arquitetônica inferior. Naquele episódio, constata-se que o papel do desenho, como instrumento de comando do arquiteto, ainda não tinha sido firmemente estabelecido.

No que diz respeito à evolução da representação gráfica, a geometria descritiva (Figura 5), a partir do século XIX, era uma disciplina pragmática para o construtor, arquiteto e engenheiro. Permitiu pela primeira vez uma redução sistemática dos objetos tridimensionais a duas dimensões, tornando possível o controle e precisão exigidos pela Revolução Industrial (GÓMEZ; PELLETIER, 1992, p. 34).

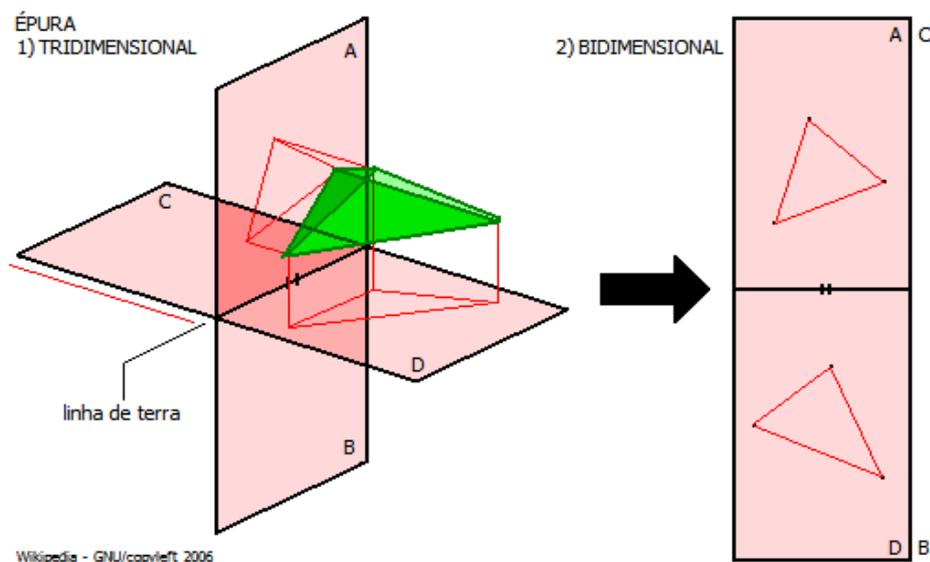


Figura 5 - Representação de sólido em épura

Fonte: Wikipédia, 2011

Na década de 1940, o arquiteto e crítico italiano Bruno Zevi conseguiu perceber com clareza as limitações das ferramentas gráficas, disponíveis em sua

época, para representar uma obra arquitetônica. Ele menciona a descoberta da quarta dimensão, representada na pintura cubista, necessária para responder satisfatoriamente à necessidade de compreensão do espaço do projeto de arquitetura.

No sentido de serem compreendidas e vividas, todas as obras de arquitetura requerem o tempo de nossa caminhada em torno das mesmas, isto é, a quarta dimensão, que é conceituada como o deslocamento sucessivo do ângulo visual, o movimento (ZEVI, 2009, p.17-28). Entretanto, Zevi esclarece que a quarta dimensão pode ser suficiente para entender o volume, mas não o espaço arquitetônico, o qual transcende os limites de tempo e movimento.

Se pensarmos um pouco a respeito, o fato do espaço, o vazio, ser o protagonista da arquitetura é, no fundo, natural, porque a arquitetura não é apenas arte nem só imagem de vida histórica ou de vida vivida por nós e pelos outros; é também, e sobretudo, o ambiente, a cena onde vivemos a nossa vida. (Ibid., p. 28).

Esse conceito amplo de arquitetura, envolvendo o nível de complexidade apresentado na citação acima, e a capacidade de perceber os limites das formas de representá-la, criaram uma demanda constante para que os arquitetos busquem novos instrumentos e meios para satisfazer plenamente a condição de representar e, conseqüentemente, de realizar seus projetos.

Existe uma relação direta entre os meios de representação e produção, observada por William Mitchell (apud KOLAREVIC, 2003, p. 32), segundo a qual “[...] os arquitetos desenharam o que podiam construir, e construíram o que eles podiam desenhar”.

No contexto de inovação arquitetônica, pode-se depreender, ao longo da história, que a arquitetura tem estado associada à tecnologia disponível do momento. Nesse aspecto, a relação entre a nova tecnologia e a nova arquitetura ainda é um motivo dominante na configuração de arquiteturas de vanguarda.

Na era industrial, constituem exemplos desta relação, entre outros, o edifício Cristal Palace (Figura 6), do arquiteto Joseph Paxton, construído em 1851 no Reino Unido; e a torre Eiffel, do arquiteto Gustavo Eiffel, erguida em Paris no ano de 1887. Essas obras anunciavam um futuro de edifícios altos, de aço e de vidro, que levariam cem anos para torná-los onipresentes no mundo todo (MORALES apud KOLAREVIC, 2003, p. 3).

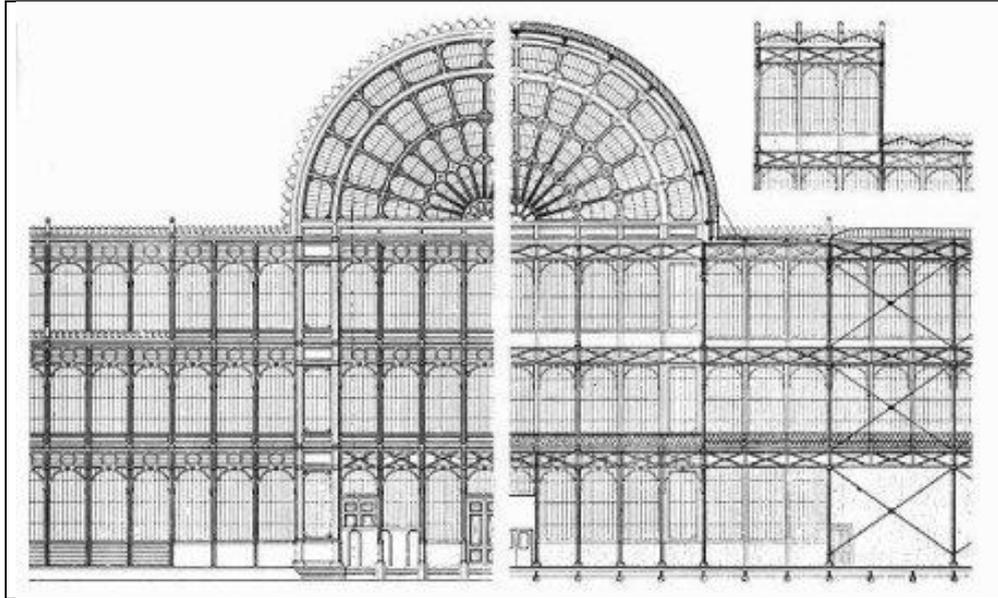


Figura 6 - O Crystal Palace, Londres (1851), Joseph Paxton

Fonte: Kolarevic, 2003, p. 3

Na Idade Moderna, a aceitação das realidades do mundo industrial foi fundamental para a abordagem de Walter Gropius. O arquiteto alemão assumiu a direção da Staatliches Bauhaus em Wiemar, no ano de 1919, com a proposta de criar uma escola de projeto e trabalhos manuais, que seria uma resposta aos desafios e oportunidades do século XX.

Gropius acabou tornando a escola um centro de experimentação, unindo a tecnologia da máquina com a teoria de projeto moderno. Enunciou sua teoria de formação de projeto unificado, segundo a qual a moderna arte arquitetônica incluía todas as atividades artísticas, bem como todos os problemas de projeto (apud KOSTOF, 1977, p. 320-321).

As implicações espirituais da arte na sociedade devem ser redefinidas e, com a ajuda dos cientistas e usando seus métodos de precisão, os componentes sociais e psicológicos da arte – não somente os componentes técnicos - devem ser determinados por uma ordem distinta de valores e significados. (Ibid., p. 322, tradução nossa).

Este pensamento representava uma parte essencial da teoria de Gropius, ou seja, a base racional de projeto. Havia a necessidade de encontrar uma linguagem científica de projeto, independentemente das subjetivas variáveis humanas. O exemplo desta arquitetura foi o próprio edifício da Escola Bauhaus, na Alemanha, um marco do século XX, que estabeleceu um novo princípio estético, com o uso de volumes limpos e definidos.



Figura 7 - Escola Bauhaus, arquiteto Walter Gropius, Dessau, Alemanha, 1926
Fonte: Archiplanet, 2011

Conforme observado, até a década de 1940, muitas foram as formas encontradas para representar um projeto arquitetônico. Entretanto, o mundo estaria prestes a viver uma nova revolução, que marcaria profundamente a maneira como arquitetos poderiam pensar e produzir arquitetura. A chamada Revolução Computacional, segundo Mitchell e McCullough (1995), teve seu avanço estimulado pelas grandes guerras mundiais que, por sua vez, aceleraram velozmente o aparecimento de novas tecnologias, como os transistores, depois os circuitos integrados até chegar ao *chip* de silício.

Por analogia, a Revolução Industrial utilizou a energia das máquinas para substituir a força muscular humana. De maneira similar, a atual revolução utiliza as máquinas de processamento de informação para executar os cálculos manuais repetitivos e complexos. Na era pós-industrial, a coleta, o processamento e a disseminação de informação têm poder cada vez maiores sobre a vida econômica (Ibid., p. 2-3).

Sobre esse aspecto, o sociólogo italiano Domenico De Masi descreve uma sociedade pós-industrial que teria recuperado o gosto pela estética, não mais para uma pequena elite, mas para todos, nas diversas áreas, tais como vestuário, ornamento, ambiente de trabalho, etc. Ainda, o autor argumenta que tal sociedade reivindica a atuação fundamental do sujeito, relacionada à “desmassificação” (De MASI, 2000). Dessa forma, é necessária muita criatividade para satisfazer às

infinitas necessidades sofisticadas do mercado, através de inúmeros grupos criativos. Segundo Domenico (Ibid., p. 188), a criatividade não significa apenas ter ideias, mas saber executá-las, unindo fantasia e concretude.

Com respeito à sociedade industrial, a pós-industrial privilegia a produção de idéias, o que por sua vez exige um corpo quieto e uma mente irrequieta. Exige aquilo que eu chamo de “ócio criativo”. As máquinas trabalharão num ritmo sempre mais acelerado, mas os seres humanos terão sempre mais tempo para refletir e para “bolar”, idear.

O homem criou as ferramentas tecnológicas para auxiliarem no processamento das informações, mas compete ao homem a condição de definir como utilizá-las. Cada vez mais, o ser humano poderá usufruir desses recursos para otimizar sua capacidade criativa. No caso do processo de projeção arquitetônica, uma vez que a tecnologia permanece em contínuo desenvolvimento, o ritmo de seu uso continua acelerado no século XXI, e os modelos digitais tendem a desempenhar um papel central nos processos de execução de projetos.

Dessa forma, segundo Mitchell e McCullough (1995, p. 464), os projetos serão tratados por *softwares*, com ferramentas de edição complexa, e por programas de gestão. Ainda, receberão insumos do trabalho conjunto de arquitetos e engenheiros, consultores e agentes de *softwares* inteligentes, cujas informações serão inseridas e extraídas do modelo único digital, produzindo a entrada para sistemas de visualização. Os modelos digitais servirão para gerar desenhos e relatórios, e permitirão o uso de ampla gama de *software* de análise e crítica, de sistemas de prototipagem rápida e de instalações de sistemas CAD/CAM.

Neste contexto, Pentilla conclui que o profissional responsável pela arquitetura contemporânea precisa ser um excelente comunicador e coordenador, capaz de lidar com a infinidade de equipamentos e aplicativos de comunicação digital de que dispomos atualmente. Ao mesmo tempo, o profissional deve ser capaz de coordenar o fluxo de toda essa informação, que geralmente acontece simultaneamente e à distância (PENTILLA apud NARDELLI, 2007, p.35).

A seguir, a figura 8 ilustra o papel integrador desempenhado pelo modelo digital. A coluna do lado esquerdo ilustra, de forma esquemática, os profissionais que podem inserir e alterar dados na elaboração do modelo digital. A coluna de retângulos da direita representa os diversos sistemas que podem utilizar as

informações do mesmo modelo. Por último, na coluna da extrema direita, observar-se o que estes sistemas podem gerar de novas informações e produtos.

Na Figura 8, os textos destacados com a moldura em negrito representam o recorte desta pesquisa. Conforme ilustrado nesta figura, seguindo o sentido das setas, o arquiteto como agente gerador do modelo digital, e o sistema de prototipagem rápida para obtenção do modelo físico, são centrais neste trabalho.

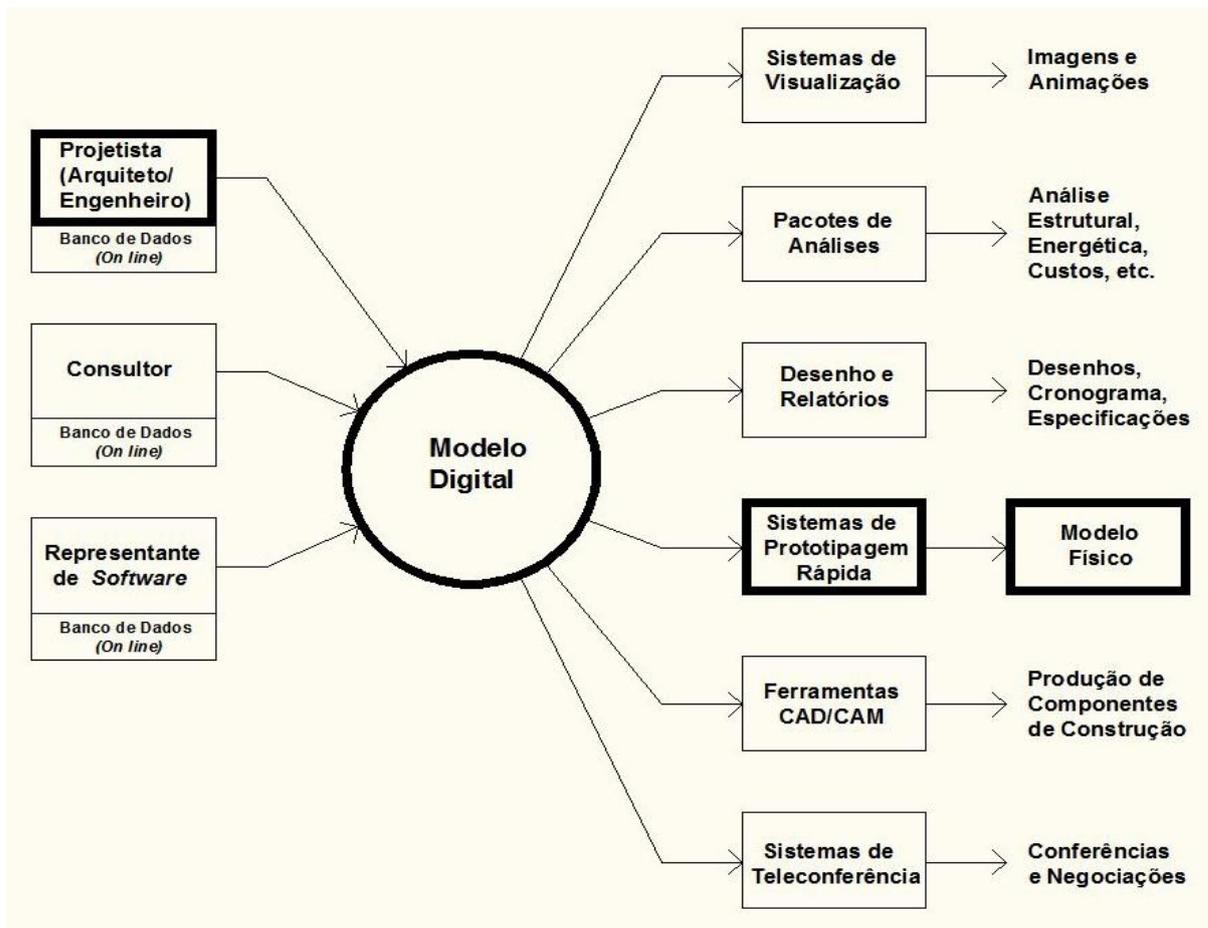


Figura 8 - O papel integrador do modelo digital

Fonte: Mitchell; McCullough, 1995, p. 465, (tradução nossa)

2.2 O processo digital de projeção arquitetônica

Desde a antiguidade, o profissional da arquitetura utilizava desenhos e modelos que, a partir do Renascimento, ganharam os recursos da escala e da perspectiva, e permanecem até os dias de hoje como sendo as ferramentas de trabalho de uso mais comumente utilizadas na área de projeto e construção, devido as suas características:

O uso de desenhos e modelos em escala serviu como meio mais usual para arquitetos se comunicarem com os construtores e clientes. Novas técnicas de desenho e a realização de maquetes possibilitaram aos arquitetos experimentar diferentes soluções de projeto e testar no papel aspectos de forma e função antes da construção do edifício. (KALAY, 2004, apud ANDRADE et al., 2011, p.83).

De maneira simplificada e resumida, o quadro abaixo apresenta a evolução da definição do profissional da arquitetura, as ferramentas de trabalho utilizadas e o produto gerado, em relação ao respectivo período da história:

Quadro 2 - Resumo esquemático da evolução das ferramentas de representação na arquitetura

PERÍODO	IDADE ANTIGA	IDADE MÉDIA	BAIXA IDADE MÉDIA / RENASCIMENTO	IDADE MODERNA	IDADE CONTEMPORÂNEA
PROFISSÃO	Mestre Construtor	Mestre Construtor	Arquiteto	Arquiteto	Arquiteto
FERRAMENTAS DE TRABALHO	Fala Escrita Desenho Modelo Físico	Fala Escrita Desenho Modelo Físico <u>Medidas</u>	Fala Escrita Dimensões Modelo Físico <u>Desenho em Escala</u> <u>Perspectiva</u>	Fala Escrita Dimensões Modelo Físico Desenho em Escala Perspectiva <u>Geom. Descritiva</u>	Fala Escrita Dimensões Modelo Físico Desenho em Escala Perspectiva Geom. Descritiva <u>Ferram. Digitais</u>
PRODUTO	Desenho Obra	Desenho Obra	<u>Contrato</u> <u>Projeto</u> (Obra?)	Contrato Projeto (Obra?)	Contrato Projeto <u>Fabricação:</u> Obra
Tempo	→			Era Industrial	Era Digital

Fonte: Autoria nossa

Atualmente, os desenhos podem ganhar o reforço das ferramentas digitais de modelagem virtual, que permitem simular a edificação em três dimensões, com movimento, de maneira muito próxima à realidade. Em complemento, o modelo físico antes produzido manualmente pode ser fabricado com o auxílio de equipamentos digitais, gerando os protótipos rápidos, como descrevem Kolarevic e Kvan (2002, p. 278, tradução nossa):

Na forma digital, geometrias que desafiam os modos convencionais de descrição ou de comunicação podem ser criadas. As ferramentas de projeção digital permitem ao *designer* gerar e explorar formas difíceis de descrever por outros meios.

Os arquitetos adotavam processos de projeto apoiados em regras, com a intenção de reduzir a probabilidade de erros na construção (ANDRADE et al., 2011,

p. 83). Uma vez que os desenhos bidimensionais de arquitetura obedeciam a leis diferentes da construção, o que se representava não era, necessariamente, o que poderia ser construído de forma tridimensional.

O processo de projeto arquitetônico, para Andrade et al. (Ibid.), é dinâmico, composto por diversas fases intercaladas por ciclos de decisões e métodos diversificados, dos mais sistemáticos aos mais intuitivos. No sentido de buscar a solução desejada, é necessário que os projetistas realizem certas atividades e tenham habilidades específicas. Por outro lado, Lawson salienta, acima de tudo, que esse processo é ação para mudar o ambiente de alguma forma (2005 apud ANDRADE et al., 2011, p. 81).

Um dos métodos de projeto que teve destaque na década de sessenta foi desenvolvido pelo engenheiro industrial Morris Asimow, baseado em pesquisas operacionais, e consiste em atividades gerais de resolução de problemas, por meio da aplicação de técnicas processuais. Embora seja um modelo genérico com pouca aplicabilidade em projetos de arquitetura, ele influenciou os métodos de projeto arquitetônico (ANDRADE et al., 2011, p. 84-85).

De maneira mais simplificada, um mapeamento proposto por Lawson representa o ciclo de uma sequência composta por análise, síntese e avaliação de decisões de processo de projeto. Essa sequência deve ser compreendida como parte de um processo de projeto que seja flexível, articulado e com ciclos interativos, posto de forma conjunta (Ibid., p. 87), conforme ilustra Figura 9 abaixo:

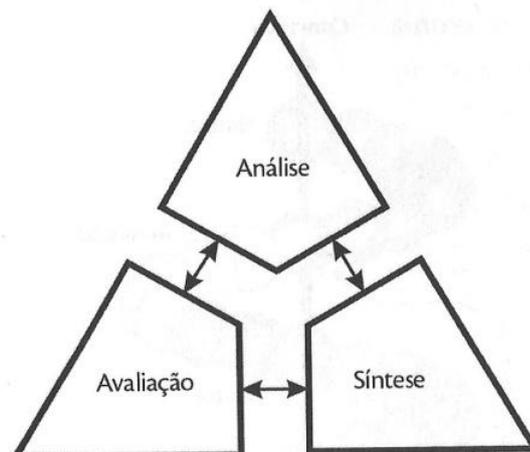


Figura 9 - Mapeamento proposto por Lawson

Fonte: Lawson, 2011, p. 47

Ainda sobre o mapeamento proposto por Lawson, a análise é a fase de assimilação das condicionantes relacionadas ao projeto. A partir dela, a intenção é estabelecer uma lista detalhada de especificações, de maneira que se possa definir um programa arquitetônico com os principais critérios de desempenho que o edifício deve atender.

Uma lista completa e detalhada de verificações, que pode servir para auxiliar na elaboração de um programa arquitetônico, de maneira a ser adaptável a qualquer tipo de edificação, é apresentada pela ISO 9699 (*International Organization for Standardization*, 2004, apud ANDRADE et al., 2011, p. 88-89).

Sintetizando, os arquitetos utilizam suas capacidades criativas para elaborar possíveis soluções que atendam aos objetivos e às condicionantes observadas na etapa de análise. Por outro lado, a fase da avaliação é considerada um processo racional, vista como uma questão de experiência e julgamento, na qual a solução proposta é comparada com as metas, restrições e oportunidades que o projeto deveria atender (ANDRADE et al., 2011, p. 90).

A comunicação consiste na troca de informações entre as fases da sequência de decisões (análise, síntese e avaliação), que por sua vez serve como meio de registro e estimula o processo de projeto. A representação é um dos instrumentos utilizados pela comunicação, para efetivar o funcionamento desse ciclo.

Os projetistas utilizam abordagens variadas de métodos para encontrar as soluções de projeto; entre eles, cabe citar o método baseado em precedentes. Ao longo de toda a sua carreira, os projetistas tendem a coletar material de referência. O método baseado em precedentes de arquitetura tem a vantagem de acelerar em grande parte o pensamento, e de criar vínculos entre problemas e soluções de projeto. Isto se deve ao fato de que a maioria dos problemas de projeto apresenta similaridade com outros precedentes. Por sua vez, o projetista precisa ter capacidade de reconhecer características das situações que têm vínculo com ideias aparentemente distantes (LAWSON, 2011, p. 276-277). A aplicação de conhecimentos de precedentes deverá ocorrer de forma indireta, servindo de base para novas ideias (ANDRADE et al., 2011, p. 97).

No quarto capítulo deste trabalho - Sistemas CAD, o assunto sobre os modelos CAD, adotados para efeito de recorte desta pesquisa, é abordado de maneira mais detalhada.

3 ESTUDO DE PRECEDENTE ZAHA HADID ARQUITETOS

No presente trabalho, como estudo de precedentes, decidimos investigar o processo de projeção desenvolvido pelo escritório da arquiteta Zaha Hadid, devido ao seu notório uso de ferramentas digitais e aos resultados inovadores de sua produção arquitetônica.

Zaha Hadid formou-se em arquitetura na Architectural Association, em 1977, e estabeleceu seu escritório Zaha Hadid Arquitetos na capital Londrina. A arquitetura de Hadid é contemporânea e de vanguarda - em 2004 foi a primeira mulher a receber o prêmio Pritzker de Arquitetura. Os seus projetos construídos, além de seu trabalho teórico e acadêmico, são internacionalmente conhecidos pela dinâmica e inovação, em domínios inter-relacionados de arquitetura, urbanismo e *design*. As suas preocupações centrais envolvem simultaneamente a prática de ensino e pesquisa nesta área (HADID, 2012).

Segundo Ribeiro, a experimentação é parte integral do processo criativo de Hadid, e a construção implica em experimentação técnica e social. Entende-se como construção a expressão de um processo intelectual de uma criação estudada, que evolui a partir de uma interação definida e compreensível de suas partes. Zaha Hadid tem liberado a arquitetura do domínio da planta baixa, e introduzido uma espacialização global do mundo construído, entrelaçando a circulação com o entorno urbano (RIBEIRO, 2006).

Em muitos projetos da arquiteta, pode-se apreciar uma transição de um mundo orgânico para outro geométrico e racional. Em toda sua obra existem complexas tramas de decisões arquitetônicas inter-relacionadas, ao invés de uma explosão de criações espontâneas (Ibid., p. 66-68).

Muitas seriam as definições para tentar enquadrar a arquitetura de Hadid, que variam de modernista, cubista ou desconstrutivista, até o conceito mais amplo de arquitetura da Era Digital. Oxman (2006) entende que a arquitetura contemporânea digital é o resultado do uso das tecnologias digitais, incluindo a tecnologia de informação e comunicação, para necessariamente as tornarem viáveis. Estas tecnologias permitiram introduzir novos conceitos de espaço e formas dinâmicas e interativas (OXMAN, 2006, apud NARDELLI, 2007, p. 31).

3.1 O processo de projeto

O processo de desenvolvimento do projeto das obras de Hadid é esclarecido por Schumacher (2004), que o classifica em duas fases: a pré-digital e a pós-digital. A primeira fase, no final dos anos 1980, compreende a introdução do computador, tendo início à modelagem tridimensional de formas simples. Este processo conviveu em paralelo com o desenho manual e a pintura, com esboços tridimensionais rápidos. O computador era útil para trabalhar com uma linguagem arquitetônica estabelecida (Ibid., p. 6). Na Figura 10 abaixo, pinturas de dois projetos do início da década de 1980 representam a fase pré-digital de Hadid.

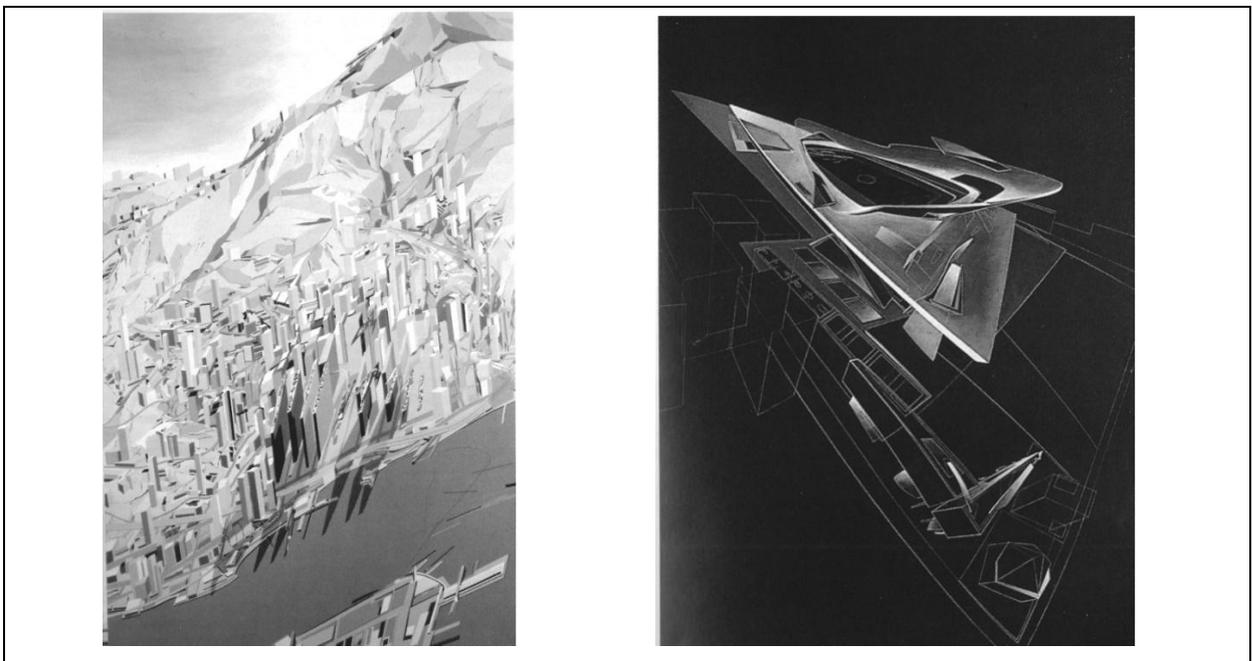


Figura 10 - À esquerda projeto urbano, The pick, Hong Kong, 1982; à direita Estádio Al Whada, em Abu Dhabi, 1988, Zaha Hadid
 Fonte: Schumacher, 2004, p. 13 e 24

Na segunda metade dos anos 1990, foram introduzidos os programas de computador que trabalham com *splines* e malhas suavemente deformáveis. Na mesma época foram introduzidos no escritório de Hadid os desenhos bidimensionais assistidos por computador, para a elaboração de plantas baixas, cortes e seções.

Na fase pós-digital, a grande mudança surge com o trabalho simultâneo em todos os planos, e a última mudança foi a introdução da modelagem tridimensional, com curvas complexas. Isto tornou possível a elaboração de composições igualmente mais complexas, com base nas inovações formais e conceituais

alcançadas anteriormente. As ferramentas computacionais foram usadas para apoiar as manobras ambiciosas dos projetos em curso. Esse processo foi uma evolução de muitos pequenos passos, ao invés de algumas rupturas singulares (Ibid., p. 7).

Hadid utilizava técnicas para elaboração de distorção projetiva, para reunir uma multiplicidade de elementos em um campo de força geométrico. Naquele momento estavam sendo definidas as técnicas atuais, baseadas em deformação por computador, e os campos modelados por meio de forças pseudogravitacionais.

A arquiteta utilizou, como simulação de representações tridimensionais, os diferentes tipos de perspectivas, como uma nova maneira para dinamizar o espaço implícito. No início, essas projeções foram implantadas de acordo com a sua devida função, como meio de representação. Ela construiu espaços pictóricos, nos quais múltiplas perspectivas de construções foram fundidas, sem costura, em uma textura dinâmica. Uma maneira de entender estas imagens é tentar emular a experiência de passar por uma composição arquitetônica, revelando uma sucessão de diferentes pontos de vista (Ibid., p. 8-9).

Uma segunda característica predominante das grandes pinturas de Hadid é a técnica de estratificação e, concomitantemente, de interpretação de elementos com transparência, para revelar a profundidade da composição. Essa sobreposição transparente dos elementos de um desenho antecipa a interpenetração espacial literal, de figuras geométricas em ordem, para criar organizações mais complexas.

A terceira característica do trabalho inicial de Hadid é a idéia de manipular o plano de apoio, por meio de corte e deformação. Essa elaboração do solo, como superfície manipulada e moldada, antecipa o uso atual de modeladores digitais de superfície, e a ideia de articulação arquitetônica, através de dobraduras de superfície - "*folding*", implica em conceito do edifício como uma superfície única e contínua (Ibid., p. 8-10).

Para Iwamoto (2009), na fabricação digital, *Folding* é uma técnica de dobra de material que produz naturalmente deformação e inflexão, atribuindo rigidez estrutural, em uma ampla gama de formas. Também pode ser considerado como um método que transforma duas dimensões em três dimensões, com auxílio de *softwares*, permitindo produzir e construir uma superfície espacial tridimensional modulada. Os materiais de construção são trabalhados, dobrados, no próprio local da obra. Por estas características, *Folding* é considerado um instrumento

arquitetônico conceitual que possibilita criar fluidez e multifuncionalidade, por meio de superfícies contínuas (IWAMOTO, 2009, p. 62-64).

Em entrevista com Mohsen Mostafavi, Zaha Hadid descreve a relação entre seus próprios desenhos e conceituações, com o uso dos computadores em seu escritório. Defende que os desenhos bidimensionais e as plantas ainda são seminais, e que o computador permite mostrar vários pontos de vista 3D e de movimento. Zaha prefere ver a imagem na tela do computador, devido a sua luminosidade, do que a imagem impressa. Entretanto, os modelos físicos e os croquis são ferramentas de representação que também contribuem no seu processo de projeto (SCHUMACHER, 2004, p.10-11).

Zaha explica que uma certa distorção em seus desenhos permite ver o projeto em todas as possíveis perspectivas. O longo tempo para construir o desenho elaborado possibilita adicionar diversas camadas, enquanto que o modelo físico oferece oportunidades de projeto pela natureza peculiar do material.

Por meio da observação do modelo é possível começar a ver as coisas de diferentes maneiras, então, a representação começa a informar o trabalho e isto lhe fornece ideias. No sentido de permitir que se veja de forma transparente através de um edifício, utiliza diferentes planos sobrepostos uns com os outros, para construir uma nova maneira de conectar os níveis como um caminho vertical, sem utilizar a circulação vertical de forma extrudada ou como um núcleo vertical (Ibid., p. 11-14).

[...] portanto, eu diria que o repertório formal que surgiu não foi completamente acidental, talvez um pouco de acidente no início, antes do desenvolvimento do projeto. Mas, então, essas descobertas acidentais foram trabalhadas através de desenhos muito precisos. (HADID apud SCHUMACHER, 2004, p. 15, tradução nossa).

Na Figura 11 abaixo, o conjunto de imagens do projeto da Estação de Trem e Estacionamento, no centro da cidade de Strasbourg, França (2001), primeiro os croquis, depois as pinturas representando o projeto, e finalmente o resultado final da obra construída. O conceito geral para o planejamento do projeto da Estação de Trem e Estacionamento foi estabelecido pela sobreposição de campos de linhas, que representam os padrões de movimentos gerados pelos carros, trens, bicicletas e pedestres. Para cada um desses elementos existe uma trajetória representada pelo traço, um dispositivo estático.

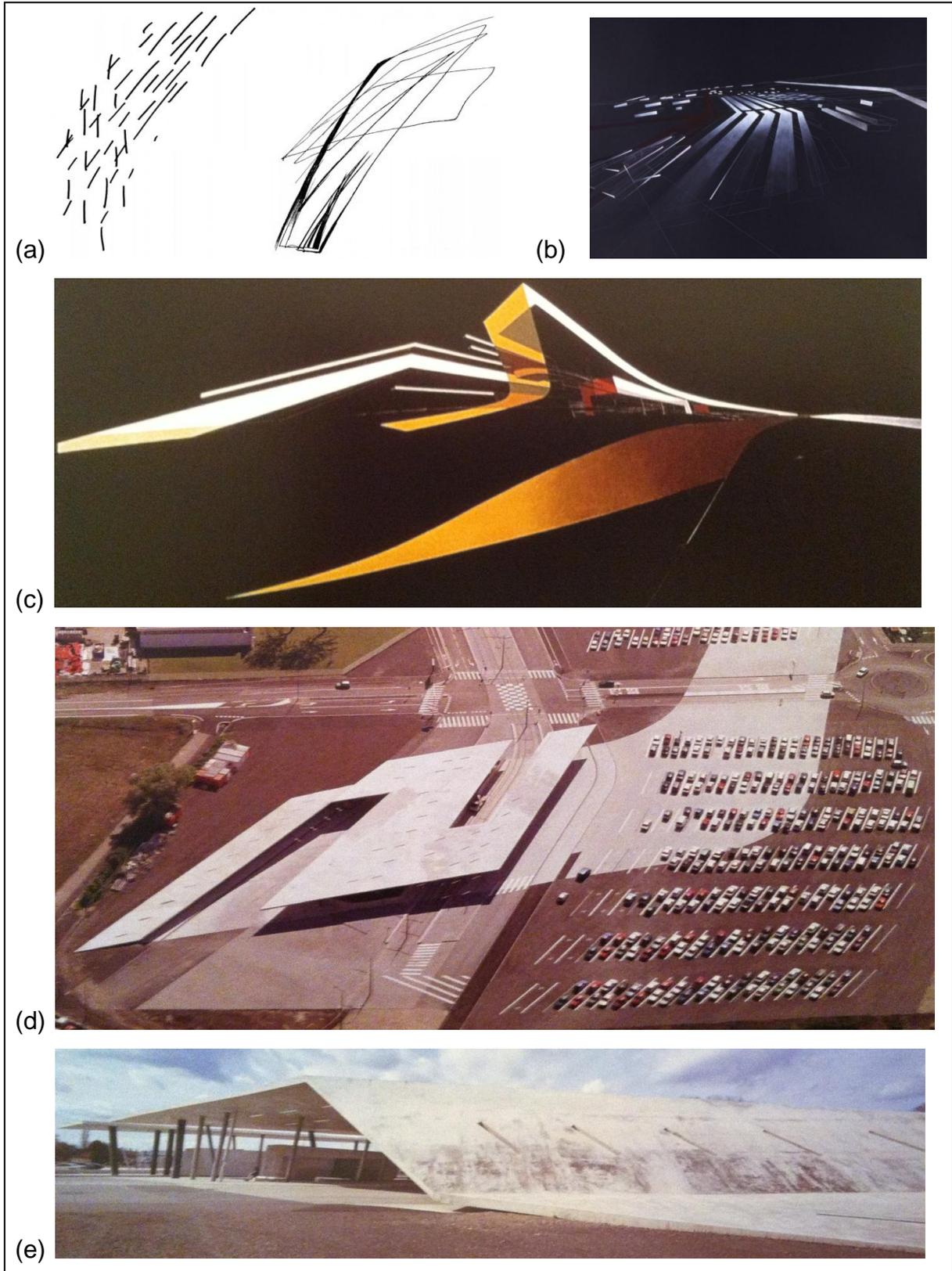


Figura 11 - (a) Croquis; (b) e (c) Pinturas; (d) e (e) Fotos da obra da estação de trem, em Strasbourg, França (2001), Zaha Hadid

Fonte (a) e (b): Hadid, 2012c

Fonte (c), (d) e (e): Phaidon, 2004, p. 380

A natureza tridimensional é enfatizada na arquitetura pelo jogo de linhas como um equipamento linear, percebido tanto no teto como no chão em tiras lineares. O traçado do projeto, que acompanha o limite do entorno local, e a trajetória dos trens e dos carros, cria uma nova noção de natureza artificial, que confunde o limite entre o ambiente natural e o artificial (PHAIDON, 2004, p. 380).

Um dos movimentos mais audaciosos de Hadid consiste em traduzir o dinamismo e a fluidez de sua caligrafia diretamente em sistemas arquitetônicos. Esses movimentos são obtidos, como uma explosão do espaço em fragmentos, por meio da superposição de diferentes perspectivas. As distorções das perspectivas permitem a orientação de elementos em diversos pontos funcionais focais.

A contribuição do seu trabalho envolve desde os dispositivos de representação, às manipulações gráficas, às manobras de composição, aos conceitos espaciais, às invenções tipológicas e até à sugestão de novos modos de habitação. Resumindo, os métodos e mecanismos de invenção que predominam no trabalho de Hadid são a recombinação por meio da colagem e hibridação; a abstração; a analogia, pois qualquer coisa pode servir como inspiração analógica, como ultimamente os sistemas orgânicos e os mecanismos surrealistas, através do uso da representação distorcida do espaço (SCHUMACHER, 2004, p. 17-29).

3.2 O uso de ferramentas digitais

O escritório Zaha Hadid continua a ser pioneiro em pesquisa e investigação em projeto. As colaborações com artistas, *designers*, engenheiros e clientes têm avançado na diversidade da prática e do conhecimento, enquanto a implementação de tecnologias de estado da arte tem ajudado na realização de estruturas arquitetônicas fluidas, dinâmicas e, portanto, complexas. Entre suas obras construídas, que são excelentes demonstrações de busca da prática do espaço complexo e dinâmico, podemos citar, por exemplo: o Edifício Central da BMW, em Leipzig, 2005; o Centro de Ciência Phaeno, em Wolfsburg, 2005 e o MAXXI, Museu Nacional de Arte do Século 21, em Roma, 2009. A Figura 12, a seguir à esquerda, apresenta o modelo digital inserido na malha urbana e, à direita, a foto com vista externa de uma das entradas do Museu.



Figura 12 - Museu Nacional de Arte do Século 21, Roma, Zaha Hadid, 2009

Fonte: Hadid, 2011b



Figura 13 - Pavilhão *Chanel Mobile Art*, Hong Kong, Tóquio, Nova York, Zaha Hadid, 2010

Fonte: Hadid, 2011a

A Figura 13 acima apresenta, à esquerda, a planta baixa do projeto e, à direita, a imagem externa do modelo digital renderizado, do pavilhão itinerário da Chanel.

Também saudadas como a arquitetura que transforma a nossa visão do futuro, com novos conceitos espaciais e formas ousadas, destacam-se as seguintes obras: Estação Terminal *Hoenheim-Nord*, em Estrasburgo, 2001, e o Centro *Rosenthal* de Arte Contemporânea, em Cincinnati, 2003. Os projetos recentemente concluídos incluem: as estações ferroviárias *Nordpark*, Áustria, 2007; o Pavilhão Ponte *Zaragoza*, Espanha, 2008; o Pavilhão *Burnham*, Chicago, 2009; e a *Chanel Mobile Art* em Hong Kong, Tóquio e Nova York, 2010 (HADID, 2011a).

Um dos projetos de Zaha Hadid que utilizou as tecnologias digitais, tanto de modelagem como de prototipagem rápida para o seu desenvolvimento e apresentação, foi o Museu de Guggenheim em Taichung, Taiwan, 2006. O projeto possui uma área de 28.000 m² para acomodar o museu, instalações para educação, restaurante, café e loja. A proposta foi baseada no conceito do museu como um espaço para eventos em constante mudança. Uma série de grandes elementos cinéticos foram planejados para oferecer a opção de transformar, radicalmente, o

arranjo dos espaços da galeria. Assim, a reconfiguração interna dos espaços de exposição pública torna-se visível mesmo na aparência externa do edifício, o qual surge gradualmente de uma formação suave da paisagem.

A Figura 14 apresenta, à esquerda, uma vista superior externa e, à direita, uma vista interna do modelo digital do Museu. A Figura 15 mostra, à esquerda, uma vista superior externa e, à direita, uma vista da lateral externa do protótipo rápido do modelo digital do Museu.

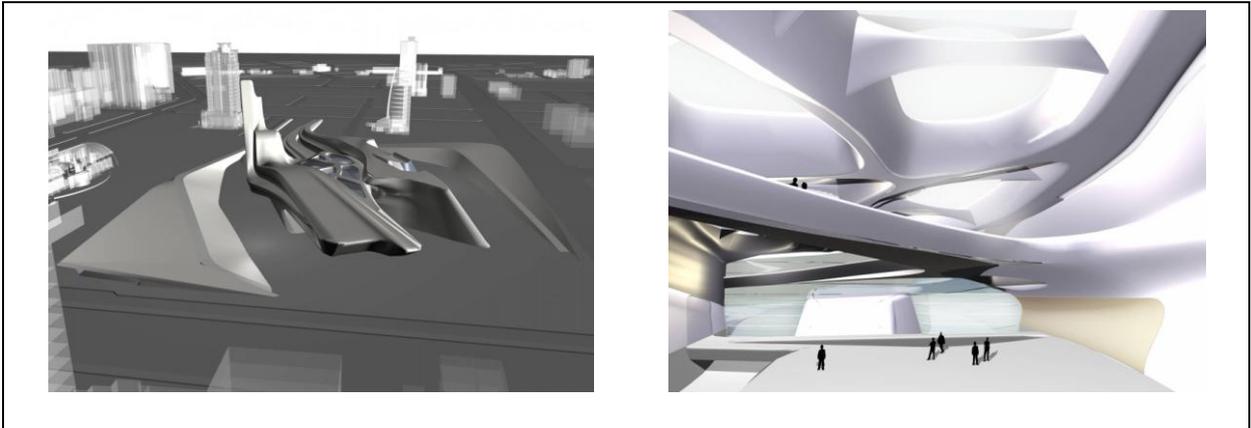


Figura 14 - Imagens do modelo virtual, Museu de Guggenheim em Taichung, Zaha Hadid, 2006
Fonte: Hadid, 2011a

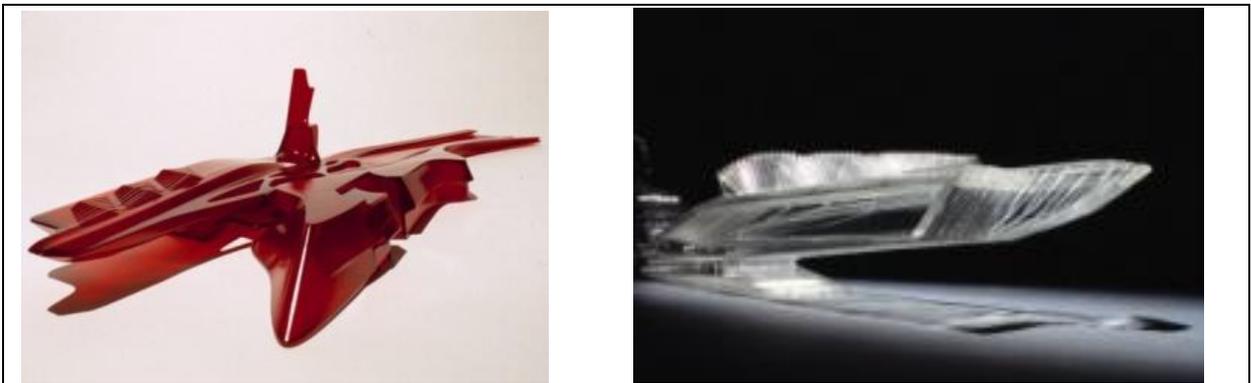


Figura 15 - Fotos do Modelo Prototipado, Museu de Guggenheim em Taichung, Zaha Hadid, 2006
Fonte: Hadid, 2011a

No Museu de Guggenheim, a linguagem formal e a articulação de arquitetura têm como premissa a idéia de que a construção é drenada para o espaço público aberto do eixo urbano. Tanto o fluxo do público, através da construção, como a circulação interna, através dos espaços de exposição, são expressos por meio de rampas arrebatadoras. O dinamismo global e a fluidez da forma alongada sugerem uma ênfase do movimento, através e ao redor do edifício (SCHUMACHER, 2004, p. 83-88).

No sentido de representar e permitir criar um impacto visual do Museu Guggenheim em Taichung, um modelo tridimensional com dois metros de comprimento foi produzido, utilizando-se prototipagem rápida (Figura 15). O modelo permitiu ao cliente visualizar, tocar e sentir uma versão materializada e tátil, em escala, da proposta do projeto.

A tecnologia utilizada foi a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), juntamente com o corte em Controle Numérico Computadorizado (CNC). A SLS é considerada econômica, rápida e extremamente precisa, aplicada a formas complexas, quando comparada ao modelo mais tradicional para tomada de decisões técnicas. Ainda, permite construir componentes maiores, juntando e montando várias partes, sem afetar a forma e funcionalidade do modelo do projeto (3T RPD, 2011).

Ao observarmos o processo de projeção de Hadid, destaca-se a capacidade da arquiteta em apropriar-se das ferramentas digitais para obter, com muita criatividade e controle, o resultado desejado. Seu processo considera o uso de diversas tecnologias, no sentido de não restringir as suas propostas de formas e funções, geralmente complexas. Ao longo do tempo, permitiu que as ferramentas digitais ganhassem a devida importância e espaço central no processo de projeção, de maneira a viabilizar a produção de sua obra arquitetônica.

4 SISTEMAS CAD

Os primeiros sistemas computacionais gráficos surgiram na década de 1960, com um custo extremamente elevado e de uso restrito. A partir daquela época, as aplicações computacionais na área de arquitetura e construção civil proporcionaram maior automatização, aumentaram a capacidade para gerir geometrias complexas, com maior precisão, assim como aumentaram a velocidade na execução de projetos. Os sistemas de projeto assistidos por computador (CAD) foram inicialmente usados para traduzir esboços e modelos feitos à mão, em modelos digitais bidimensionais e modelos de superfícies tridimensionais (SCHODEK, et al., 2005, p. 29).

Segundo Bozdoc, existem várias razões para o uso do CAD. A principal é o aumento da competitividade, para produzir melhores projetos, de maneira mais rápida e com menor custo em relação às empresas concorrentes. No sistema CAD as informações de desenho são armazenadas em formato digital, e os componentes que são utilizados em desenhos repetidamente podem ser representados em tamanhos diferentes e com precisão (BOZDOC, 2003, p. 1).

As limitações apresentadas por desenhos, por serem representações bidimensionais, ficam evidenciadas pela necessidade de obter inúmeras vistas para representar um objeto tridimensional, com grau de detalhamento adequado para a construção. Por outro lado, numa tentativa de obter precisão, essa representação bidimensional detalhada poderia correr riscos de gerar erros.

Outra limitação dos desenhos é a condição de não poderem ser interpretados por computadores, uma vez que são armazenados como linhas, arcos e anotações de texto, os quais somente são interpretáveis por algumas pessoas. Por outro lado, segundo Eastman, os objetos representados tridimensionalmente são legíveis para as máquinas, e permitem que os conflitos espaciais em um modelo de construção possam ser verificados automaticamente antes de sua execução (EASTMAN, 2007, p. 1-2).

Nesse aspecto, os sistemas de desenho e os sistemas de modelagem - chamados *wireframe*, fornecem recursos para inserir vários tipos de linhas. Os sistemas de modelagem de superfície fornecem operações para inserir vários tipos de superfícies. Por sua vez, os sistemas de modelagem de sólidos fornecem

operações para inserir vários tipos de sólidos fechados. Na maioria dos contextos de projeto é necessário alargar o repertório de possibilidades, apropriando-se de operações para a construção de sólidos a partir de pontos, arestas e superfícies, além da combinação de sólidos simples para a obtenção de sólidos mais complexos (MITCHELL; McCULLOUGH, 1995, p. 240).

Quanto às formas tridimensionais sólidas, suas capacidades de criação e edição foram desenvolvidas de maneira fácil e arbitrária, em 1973, e são atualmente conhecidas como modelagem de sólidos. Estes esforços produziram a primeira geração de ferramentas de projeto tridimensional na prática de modelagem, representadas sob duas formas: a *Boundary Representation* (B-Rep) e a *Constructive Solid Geometry* (CSG).

A figura abaixo representa, à esquerda, o resultado avaliado de um modelo em B-Rep e, à direita, o resultado não avaliado do modelo CSG. Mais abaixo, ainda nesta mesma Figura 16, são apresentadas as formas primitivas que compõem a árvore da construção do modelo.

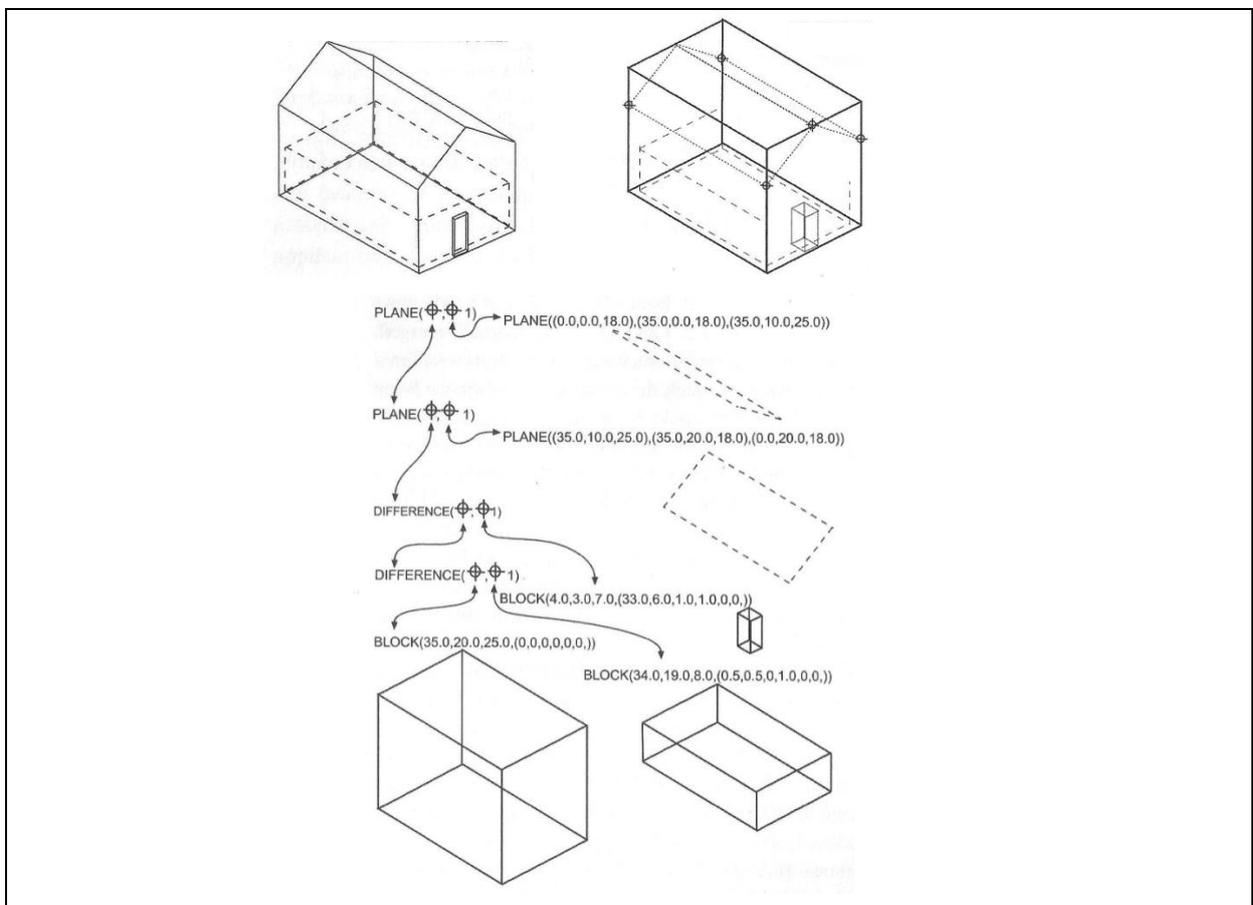


Figura 16 - Modelagem B-Rep e Modelagem CSG

Fonte: Eastman et al., 2008, p. 28 (tradução nossa)

A primeira (B-Rep) define formas usando operações por meio de união, interseção e subtração, também chamadas operações *booleanas*. Estas operações são utilizadas para refinar a geometria do modelo, como chanfros ou cortes, ou para mover um buraco dentro de uma única forma. A segunda (CSG), é representada por uma árvore de operações, e conta com diversos métodos para avaliar a forma final (EASTMAN et al., 2008, p. 26).

A fusão dos métodos B-Rep e CSG permitiu que objetos fossem editados e gerados sob demanda, constituindo-se em um importante aspecto precursor para a modelagem paramétrica moderna (Ibid., p. 26-27).

Esses tipos de estruturas de dados, de modelagem de sólidos, necessitam de equipamentos mais potentes, com mais memória, quando comparados com a manipulação de dados de uma estrutura em *wireframe* ou de algumas formas de modelos de superfície. Isto se deve à necessidade de manter uma rica rede de associações entre os elementos, e impedir a produção de sólidos inválidos, durante as operações associadas de transformação e combinação (MITCHELL; McCULLOUGH, 1995, p. 238).

Os primeiros sistemas CAD, desenvolvidos entre a década de 1960 até a década de 1990, foram adaptados por meio de transferência de tecnologia, para os sistemas específicos de projeto arquitetônico assistido por computador. Estes sistemas foram utilizados com a intenção de permitir a solução completa para a informatização da arquitetura. Justamente por sua característica de uso geral, apresentaram um alcance limitado, na distinção entre projeto e desenho. Devido a isso, a sua aplicação acabou restrita a tarefas de implementação, como para representação de desenhos de apresentação e execução final (KOUTAMANIS, 2005, p. 631).

Na segunda metade da década de 1990, com a redução dos custos, as tecnologias de informática começam a ser amplamente aceitas na educação e na prática da arquitetura. Os sistemas CAD de uso específico na arquitetura seguem duas tendências de evolução. A primeira é caracterizada por uma preocupação com transferência de tecnologia, e leva à adoção antecipada de novos desenvolvimentos promissores. A segunda, tenta manter o caráter holístico da área, por demarcações mais claras e aumento da coerência entre a teoria, níveis de algoritmos e implementação. Existe, também, uma migração limitada desse sistema em

disciplinas altamente especializadas, com a informatização fornecendo soluções diretas a perguntas de desempenho, produtividade e eficiência (Ibid., p. 634-636).

A primeira geração de sistemas CAD tinha como objetivo apoiar o processo de projeto e não o de prever soluções pré-definidas ou prontas. Neste sistema, os projetistas podem explorar com bastante flexibilidade as formas geométricas. A outra geração de ferramentas CAD surgiu com a intenção de automatizar o projeto e a documentação, utilizando elementos de construção geralmente reconhecidos, como por exemplo, tipos de paredes, tipos de janelas, entre outros elementos. É difícil encontrar em um mesmo *software* as vantagens destas diferentes abordagens, como a flexibilidade de modelar geometrias complexas, associada à automatização de padrões de objetos arquitetônicos (MARK et al., 2008, p.170-171).

Segundo Mark et al. (Ibid., p. 174), algumas observações em comum podem ser consideradas a respeito da abordagem sobre o projeto assistido por computador. A primeira é que o processo de projeto em arquitetura está diretamente associado à modelagem geométrica. Os modelos geométricos devem ser mutáveis e com menos representações pré-definidas.

As variações da geometria do modelo não devem apenas ser um desejo do projetista, mas um conjunto de relações que se estabelecem entre objetos e regras definidas e controladas pelo próprio projetista. Por último, um projeto provém de relações ambíguas e vagamente definidas entre os objetos, para depois partir para relações deliberadamente associadas.

Baseados nestas observações, os mesmo autores propõem que a próxima geração de ferramentas de projeto enfatize a diversidade de abordagens especializadas, ao invés de soluções tecnológicas abrangentes. Isto poderá ocorrer, às vezes, no processo de modelagem geométrica, reengajando as histórias de como os objetos individuais são criados. Os sistemas baseados no conhecimento, abordagens e regras não deverão ser totalmente deterministas. Finalmente, o desenvolvimento de ferramentas de projeto mais inteligentes continuará acenando a pesquisa e a teoria do futuro, de maneira que cada geração descubra novos paradigmas para fazer e construir o projeto (Ibid., p. 174).

Como contribuição mais significativa, a primeira geração de sistemas CAD permitiu incorporar a geometria com a razão, e possibilitou articular o raciocínio do projetista para construir um modelo geométrico. Isto pode ocorrer, por exemplo, com a crescente integração entre os sistemas CAD e a fabricação digital, aumentando a

capacidade do usuário final de construir um modelo de projeto de maneira independente (Ibid., p. 175).

4.1 Modelos CAD

Os sistemas CAD tridimensionais dispõem de recursos, tais como comandos de construção e edição de elementos geométricos para produzir modelos tridimensionais digitais, dentro do ambiente gráfico computacional. Estes são denominados modelos digitais ou modelos virtuais. O mercado oferece diversos tipos desses sistemas, que variam de acordo com a capacidade e maneira como as ferramentas permitem gerar geometrias tridimensionais diversas, em formas e complexidade.

O modelo CAD elaborado no sistema CAD genérico (ou tradicional) de projeto auxiliado por computador, por meio da interação da representação formal do bidimensional e tridimensional, automatiza os projetos de modelos tanto visualmente como na representação de desenhos bidimensionais (plantas, cortes e fachadas). As primeiras gerações de sistemas CAD (*Computer Aided Design*) foram caracterizadas pelo emprego de diversos *softwares* de modelagem geométrica e renderização, para manipular representações geométricas de objetos digitais (OXMAN, 2006, p. 246).

Dessa maneira, o arquiteto pode obter o modelo virtual, em sistema CAD tridimensional genérico, utilizando-se de ferramentas de construção de objetos digitais. Entre os sistemas disponíveis no mercado, atualmente pode-se citar: AutoCAD (Autodesk), FormZ (AutoDesSys), Maya (Autodesk), Microstation (Bentley), Rhinoceros 3D (Robert McNeel & Associates), Sketchup e Sketchup Pro (Google) (NARDELLI; VICENT, 2009).

O modelo CAD obtido por meio de sistemas CAD específicos, além dos recursos do sistema CAD tradicional como elaboração, modelagem e renderização de objetos, vincula a geometria dos objetos obtidos parametricamente a dados específicos. Ainda, acrescenta os processos analíticos de avaliação, que são normalmente associados com estimativas de custos, comportamentos estruturais e de desempenho ambiental, entre outros recursos que ampliam ainda mais a estrutura de dados do modelo (OXMAN, 2006, p. 246-247).

Esta geração de sistemas CAD, também descrita como modelagem da informação da edificação, é conhecida como sistemas BIM (*Building Information Modeling*). Nesse sentido, os principais sistemas disponíveis no mercado atualmente são: Archicad (Graphisoft), Bentley Architecture (Bentley) e Revit Architecture (Autodesk) (NARDELLI; VICENT, 2009).

Cabe ainda mencionar o processo utilizado para obtenção de modelos virtuais, por meio do qual as tecnologias digitais são utilizadas para traduzir o modelo físico para o ambiente digital, de maneira inversa ao processo normal de manufatura assistida por computador. Este processo utiliza várias técnicas de digitalização tridimensional, sendo a mais comum a que envolve o uso de uma sonda digitalizadora, para traçar características da superfície do modelo físico. O *scanner* a laser tridimensional, “*scanned point cloud*”, é uma alternativa de método de digitalização sem contato físico.

Sobre o uso dessa ferramenta, Kolarevic (2003, p. 31) defende que as tecnologias de digitalização a laser podem criar modelos tridimensionais precisos a partir de objetos reais, e que, apesar de mais caras, apresentam maior rapidez e precisão, facilidade de manuseio e eficiência, quando digitalizados objetos de menor escala.

Segundo Oxman (2006, p. 246-247), o modelo CAD obtido com a evolução das novas técnicas permite um processo de materialização do modelo virtual, por meio da fabricação digital. Permite também a realização do processo inverso de digitalização do modelo físico em modelo virtual, por meio do uso de equipamentos de digitalização tridimensional. Este processo é cada vez mais bem integrado com os processos de manufatura e lógica de fabricação, e evoluiu para uma integração perfeita de virtual com material e vice-versa.

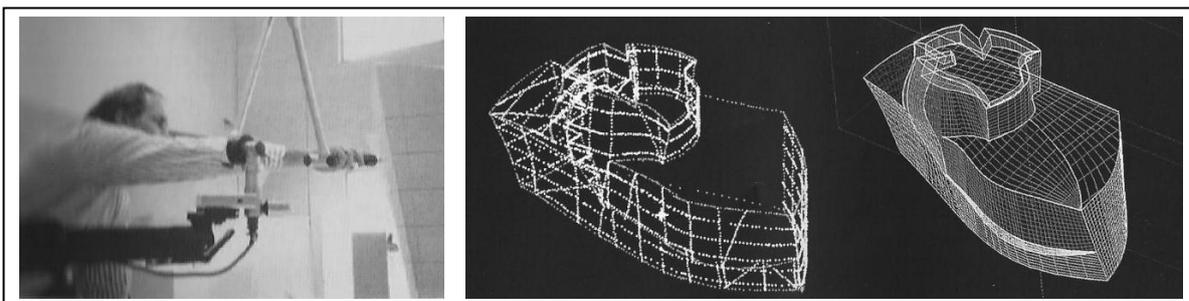


Figura 17 - O processo de digitalização do modelo físico, no escritório de Frank Gehry
Fonte: Kolarevic, 2003, p. 31

O arquiteto Frank Gehry utiliza essa tecnologia durante o seu processo de criação, ao projetar modelos físicos feitos manualmente, digitalizando-os para usufruir dos recursos tecnológicos computacionais. A Figura 17 apresenta, da esquerda para a direita, a sequência do processo de digitalização, utilizando um *scanner* tridimensional sobre o modelo físico; a imagem com os pontos digitalizados e finalmente a reconstrução da superfície com o modelo digital.

É importante salientar que a maioria dos sistemas CAD tridimensionais, genéricos ou específicos, permitem ao arquiteto gerar modelos virtuais, adequados para aplicações interativas onde o *feedback* visual é necessário. Ryder et al. (2002, p. 289) mencionam que as ferramentas digitais de projeto tridimensional permitem a visualização com deslocamento, no modelo em escala 1:1.

Kalisperis (1996, p. 24) destaca, além das vantagens citadas acima, outras vantagens observadas no uso do modelo virtual, em sua experiência acadêmica no curso de arquitetura na Universidade da Pensilvânia. Ressalta, por exemplo, as técnicas de visualização tridimensionais que possibilitam aos alunos compreender o espaço e a forma, associados com a textura, contraste e cor, e a explorar o movimento espacial e temporal. Ainda, o modelo virtual é usado para estudar a luz e seus efeitos sobre o espaço arquitetônico e, por fim, o tempo e o movimento, que causam a mudança de luz, de tonalidade e de sombra, os quais podem ser analisados juntamente com os elementos estáticos do projeto.

4.2 Modelos BIM

Conforme mencionado anteriormente, o modelo virtual também pode ser obtido por meio de sistemas CAD específicos, o que aponta para a necessidade de entendimento sobre os sistemas BIM. Conforme Eastman et al. (2008, p. 13), os sistemas BIM podem ser conceituados como “uma tecnologia de modelagem e um conjunto associado de processos, para produzir, comunicar e analisar modelos de edificação”. Estes modelos de edificação são caracterizados por componentes representados por objetos digitais inteligentes que “sabem” o que são, e podem ser associados com atributos de dados e regras paramétricas.

O mesmo autor complementa que o conceito de objetos paramétricos é central para o entendimento da modelagem de informação de edificação (BIM).

Estes consistem em definições geométricas associadas a dados e regras. A geometria é integrada de forma não redundante, o que permite que não haja inconsistências. As regras paramétricas para os objetos modificam automaticamente as geometrias associadas e aplicadas ao modelo único do edifício, permitindo atualização automática quando mudanças são feitas nos objetos associados.

Cada objeto tem suas propriedades paramétricas, cujos valores podem ser modificados pelo usuário. Alguns têm fórmulas embutidas que remetem a um comportamento do objeto modelado, e agem em resposta ao que o usuário definiu em seus parâmetros (CRESPO; RUSCHEL, 2007, p. 6).

Os recursos disponíveis nos sistemas BIM permitem que o projeto seja construído virtualmente, de maneira que o seu modelo único é tratado como objeto inteligente, e simula características físicas da edificação o mais próximo à realidade. Devido a estes recursos, Piñón (2008 apud ANDRADE; RUSCHEL, 2011, p. 437), afirma que a modelagem tridimensional pode ser considerada mais apropriada como recurso de projeção, em comparação ao sistema tradicional de representação abstrata, definido por plantas, cortes e fachadas.

Nos sistemas BIM, os objetos podem ser definidos em níveis diferentes de aglomeração. Por exemplo, pode-se definir uma parede assim como os seus componentes relacionados. As regras definidas nos objetos permitem identificar quando uma mudança particular viola a viabilidade do componente, referente à fabricação, tamanho, etc. Os objetos têm a capacidade para junção ou recepção, transmissão de conjuntos de atributos - por exemplo, materiais estruturais, dados acústicos, dados de energia, etc. - para outras aplicações e modelos (EASTMAN et al., 2008, p.14).

Dessa forma, a parede de um edifício não é representada somente por linhas, mas também pelas características físicas do seu material, como a unidade de energia com absorção e reflexão.

O resultado do uso da ferramenta BIM é mais do que um modelo para visualização do espaço projetado; é um modelo digital composto por um banco de dados; que permite agregar informações para diversas finalidades, além de gerar aumento de produtividade e racionalização do processo (TSE; WONG, 2005, p. 1-2). Um processo com maior integração entre projeto e construção, quando implementado de forma adequada e utilizando-se sistemas BIM, resulta em edifícios

de melhor qualidade com menor custo, além de redução de tempo de projeto, quando comparado à utilização de outros sistemas (EASTMAN et al., 2008, p. 1).

Os benefícios obtidos por projetos desenvolvidos em sistemas BIM podem ser destacados na visualização antecipada e precisa do projeto tridimensional; na correção automática de alterações feitas no projeto, na capacidade de extração de desenhos bidimensionais coerentes e precisos, em qualquer fase de projeto; na colaboração antecipada das múltiplas disciplinas de projeto; na fácil verificação da intenção do projeto, além da emissão de listagens de quantitativos de áreas e materiais, para realização de estimativa de custos mais próxima à realidade; na vinculação com ferramentas que permitem a avaliação e aprimoramento da eficiência energética e, por fim, na sustentabilidade no modelo de projeto (Ibid., p. 17-18).

No sentido de permitir que os arquitetos disponham de mais tempo para decidir as soluções e fazer testes de projeto, é possível antecipar as atividades de desenvolvimento para a etapa de concepção do projeto, por meio do uso de sistemas BIM (AMBROSE, 2006 apud ANDRADE; RUSCHEL, 2011, p. 436):

O grande potencial do uso do BIM em projeto está na possibilidade de revigorar a prática contemporânea da arquitetura, pelo desenvolvimento e exploração do processo de projeto e de metodologias que voltem a priorizar formas de ver, pensar e criar durante o processo de projeto. Com isso, pode-se aumentar significativamente o espaço de soluções, vislumbrando-se alternativas que dificilmente seriam pensadas na forma “analógica” de projetar.

Dessa forma, observa-se a tendência da utilização de sistemas BIM desde o início do processo de projeção, momento crucial em que o arquiteto necessita de informação com qualidade, em termos de especificidade, precisão e coerência, para auxiliar na sua tomada de decisão, especialmente no que se refere aos custos da edificação.

5 SISTEMAS CAM

A história da tecnologia CAD/CAM teve início no século XIX, com o tear de Jacquard. Este dispositivo, criado pelo mecânico francês Joseph-Marie Jacquard, era controlado digitalmente por meio de cartões perfurados e podia ser utilizado para produzir arbitrariamente complexos padrões de tecidos (MITCHELL; McCULLOUGH, 1995, p. 418).



Figura 18 - Mecanismo Jacquard de 1804, no Musée des arts et métiers, França
Fonte: Wikipédia, 2012

Na década de 1990 foi possível observar um grande avanço tecnológico, tanto nas máquinas quanto no uso das mesmas. O processo de escrever o código de controle numérico tornou-se consideravelmente mais fácil, possibilitando extrair informações geométricas diretamente a partir de um modelo digital, e usá-lo para orientar o funcionamento de uma máquina de Controle Numérico Computadorizado (CNC). Os sistemas conhecidos pela sigla CAM (Manufatura Assistida por Computador), usados para fabricar objetos ou partes da edificação facilitam, por meio do uso de *softwares*, a conexão direta com o meio ambiente CNC (SCHODEK et al., 2005, p. 25).

Somente a partir da década de 1990, os avanços computacionais aplicados à arquitetura e construção, utilizando os recursos disponíveis de sistemas CAD/CAM, começaram a ter seus benefícios reconhecidos internacionalmente de forma clara, tanto no projeto de edificação quanto nas práticas de construção. Um

dos primeiros projetos desenvolvidos e realizados digitalmente foi a escultura do Peixe, projeto do arquiteto Frank Gehry, em Barcelona no ano de 1992. Na Figura 19, observa-se à esquerda uma foto do projeto executado e, à direita, a imagem do modelo digital.

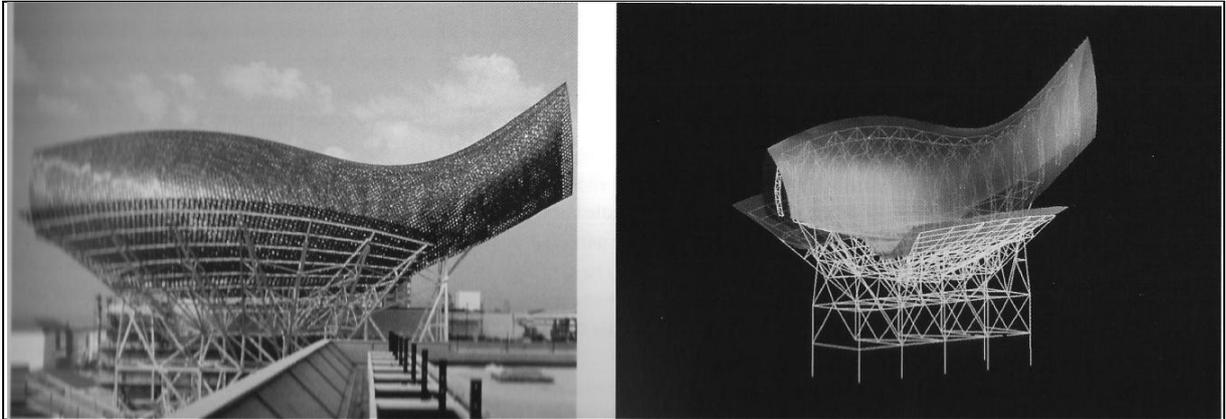


Figura 19 - A Escultura do Peixe, Frank Gehry, Barcelona, 1992

Fonte: Kolarevic, 2003, p. 107

No referido trabalho de Barcelona, as restrições de prazo e de orçamento levaram a equipe de Frank Gehry e Jim Glymph a buscar um programa com ambiente digital, capaz de projetar e produzir a geometria complexa do projeto. A solução foi encontrada em um programa desenvolvido pela indústria aeroespacial francesa, chamado CATIA. Nesse *software*, os modelos tridimensionais digitais foram usados para o desenvolvimento do projeto, na análise e fabricação estrutural, e como fonte de informações de construção (KOLAREVIC, 2003, p. 31).

Como no passado, as arquiteturas digitais contemporâneas encontraram sua legitimação na exploração dos últimos avanços tecnológicos, novos meios digitais de concepção e produção, e o correspondente estético de superfícies complexas e curvilíneas. Como uma manifestação de novos processos orientados por informações, que estão transformando as culturas, sociedades e economias em escala global, elas são vistas como um produto lógico e inevitável do espírito da época digital. (Ibid., p. 5, tradução nossa).

Novos processos de projeção e fabricação conduzidos digitalmente re-estabeleceram uma relação direta entre a arquitetura e os seus meios de produção. O processo de projeção representado e controlado digitalmente, por meio de modelos tridimensionais, origina novas possibilidades arquitetônicas.

Assim, a fabricação digital é usada conjuntamente com as tecnologias de Controle Numérico Computadorizado (CNC), que permitem a transferência de dados

de um programa de modelagem tridimensional CAD para uma máquina CNC (SCHODEK et al., 2005).

As tecnologias CNC compartilham algumas características básicas, como as instruções que descrevem que o trabalho a ser realizado deve ser num formato digital. A seguir, as instruções são lidas digitalmente por um controlador, que as codifica e as converte para serem conduzidas por impulsos elétricos. Os equipamentos são as próprias ferramentas usadas para produzir o produto final (Ibid., p. 238).

Este processo de produção e fabricação, implementado por meio de maquinários CNC, pode ser baseado em conformação, corte, subtração e adição do material.

Na fabricação por conformação são aplicadas aos materiais forças mecânicas, calor ou vapor, até que os mesmos sejam deformados ou remodelados conforme desejado, Figura 20 (a). Os materiais como vidro, metal e madeira podem sofrer este processo. No caso do metal, esta deformação pode ser permanente. Ao final, o processo permite obter superfícies compostas com dupla curvatura (KOLAREVIC, 2003, p. 38).

Segundo Schodek et al. (2005, p.269), no processo de conformação os materiais podem ser deformados e moldados com o uso simples, repetido ou até mesmo contínuo da força. Os processos geralmente referem-se ao tipo de estresse pelo qual a peça trabalhada é submetida. Existem vários métodos, que variam da flexão manual individual para realizar a estampagem, até o método de forjamento em maiores quantidades de peças.

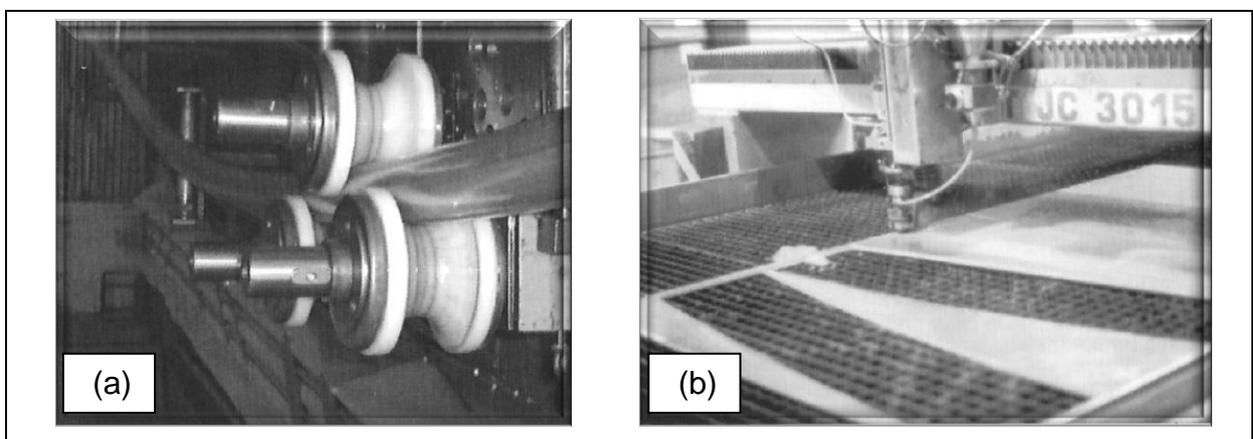


Figura 20 - Processos de fabricação digital: (a) Conformação e (b) Corte

Fonte (a): Kolarevic, 2003, p. 38

Fonte (b): Kolarevic, 2003, p. 34

Apesar das vantagens apresentadas pela técnica anterior, a técnica de fabricação mais usada é o corte CNC ou fabricação bidimensional, Figura 20 (b). O arco-plasma, raio-laser e jato d água são tecnologias que funcionam com o movimento de dois eixos, que podem ser da mesa de apoio com a chapa do material, do movimento da cabeça de corte, ou da combinação do movimento de um em relação ao outro. Existem grandes diferenças entre essas tecnologias, no que diz respeito aos tipos de materiais e capacidade máxima de espessura para corte (KOLAREVIC, 2003, p. 34).

Por sua vez, a terceira técnica de fabricação por CNC, a subtração, Figura 21 (c), envolve a remoção de determinado volume de material, utilizando os processos elétrico, químico ou mecânico de redução por fresa multieixo (de diferentes diâmetros e comprimentos). Inicialmente, a fresa de topo maior retira o material e a menor encarrega-se do acabamento. A velocidade de rotação da fresa é definida em função da densidade do material. Na fresa CNC, um sistema de computador dedicado executa as funções básicas de controle do movimento de uma ferramenta de máquina, utilizando um conjunto de instruções codificadas (Ibid., p. 34-36).

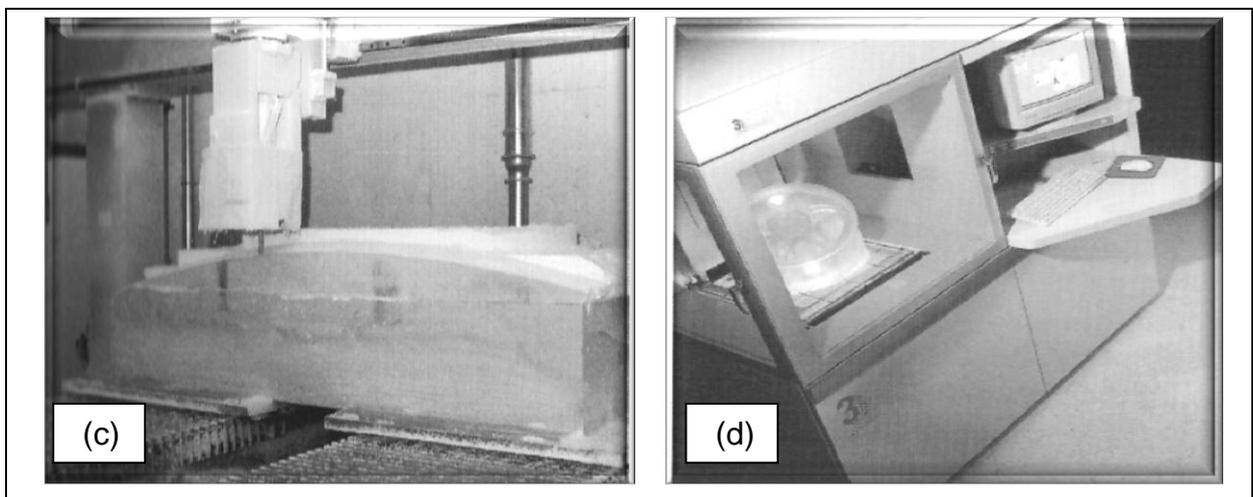


Figura 21 - Processos de fabricação digital: (c) Subtração e (d) Adição

Fonte (c): Kolarevic, 2003, p. 35

Fonte (d): Kolarevic, 2003, p. 37

Por fim, a fabricação por adição, Figura 21 (d), consiste na formação por meio de adição incremental de camadas de material de impressão. A técnica parte da divisão do modelo sólido virtual em camadas de espessura milimétrica. Em seguida, a informação é transferida para a máquina que amolda camada por

camada, gerando o modelo físico. Este processo de fabricação possui aplicações restritas na construção de edificações, devido ao tamanho limitado dos modelos produzidos, sendo muitas vezes referido como fabricação por camadas, de forma livre, sólida, de prototipagem rápida, ou de fabricação “*desktop*”. No processo de projeto, esta tecnologia é mais usada na fabricação de modelos com geometrias curvilíneas complexas (Ibid., p. 34-38).

Schodek et al. (2005, p. 290), complementa a descrição sobre o processo de fabricação por adição de camadas, no qual um elemento sólido deve ser dividido em partes menores seguindo uma ordem, para que possam ser reagrupados. Isto ocorre de maneira que uma parte sólida é decomposta em camadas que representam secções transversais iguais em altura, conforme especificação de cada equipamento, que por sua vez é guiado para depositar o material camada por camada até a reprodução por completo do objeto.

A tecnologia da fabricação digital permite a produção em massa de componentes de construção altamente diferenciados, com a mesma facilidade das peças padronizadas, introduzindo o conceito de "customização em massa" no projeto da edificação e em sua produção. A customização em massa, conceituada por Joseph Pine “é a produção em massa de bens e serviços individualmente personalizados, oferecendo assim um enorme aumento na variedade e personalização, sem o correspondente aumento dos custos” (PINE apud KOLAREVIC, 2003, p. 52, tradução nossa).

Segundo Kolarevic, os processos de produção conduzidos digitalmente introduzirão uma lógica diferente na produção em série da arquitetura, que se baseia na variação local e diferenciação em série. Este novo paradigma de produção é particularmente apropriado para a indústria da construção, uma vez que os edifícios são na sua maioria projetados para situações únicas.

Os componentes individuais dos edifícios podem ser personalizados e produzidos para uma grande quantidade de usuários, de forma a permitir a variação ideal, em resposta às diferentes condições locais da edificação. Assim, componentes como janelas de formas e tamanhos exclusivos satisfazem às condicionantes de diferentes cargas estruturais, de diferentes vistas e orientações solares (KOLAREVIC, 2003, p. 52-53).

Segundo os autores Kieran e Timberlake (2004, p. 129), a customização em massa oferece uma verdadeira mudança para a arquitetura e construção. Os

maquinários existentes, para a produção da arquitetura feita fora do local da obra, permitem substituir o agendamento simultâneo da fabricação em série, por um sistema personalizado. Resultam na melhoria da eficiência e da produtividade do ambiente dos edifícios produzidos, assim como na redução de custos.

Um bom exemplo de arquitetura projetada e produzida por computador, que apresentou grande eficiência em custos, foi o pavilhão “*Dynaform*” em Frankfurt, do arquiteto Bernhard Franken, 2001. O pavilhão MINI, construído tradicionalmente com estrutura ortogonal e vidro, ao lado do “*Dynaform*” e para o mesmo cliente, custou um terço a mais por metro quadrado por espaço de exposição (KOLAREVIC, 2003, p. 138). A Figura 22, a seguir, apresenta o pavilhão “*Dynaform*” com volumetria maior e forma orgânica, e ao lado o pavilhão MINI.



Figura 22 - Pavilhão “*Dynaform*” da BMW, Bernhard Franken, Frankfurt, 2001

Fonte: Kolarevic, 2003, p. 136

Os sistemas CAD/CAM não somente podem reduzir os custos e encurtar etapas, reduzindo também a sobrecarga de comunicação, diminuem a dependência dos projetistas em usar componentes da construção padronizados pela produção em massa. Este sistema permite a fabricação de formas complexas que seriam muito difíceis ou mesmo impossíveis de descrever e produzir nos meios tradicionais. (MITCHELL; McCULLOUGH, 1995, p. 418).

Em suma, além de eliminar o passo intermediário na produção de desenhos, o uso do computador pode integrar a modelagem e fabricação de elementos

arquitetônicos, reduzindo tempo e custos. Ainda, segundo Kolarevic (2003), nesse processo os sistemas CAD/CAM podem encurtar substancialmente o ciclo de produção, permitindo aos projetistas a elaboração de protótipos experimentais com formas, materiais e processos distintos, antes de comprometerem-se com as decisões finais. Isto, basicamente, redefine as relações entre projeto e produção.

É necessário que o arquiteto conheça as possibilidades de produção, tanto dos usos relacionados aos pré-moldados e pré-fabricados, como também agora as possibilidades da fabricação digital. Segundo os autores Orcioli e Celani (2010, p. 71), esta questão justifica-se pelos seguintes fatores:

[...] a fabricação digital não substitui os elementos produzidos em série, nem os elementos artesanais. Ela ocupa um nicho de produtos com geometrias complexas, que precisam ter excelente acabamento e constituem-se em peças únicas ou séries muito pequenas, cuja industrialização por métodos mecânicos não se justifica.

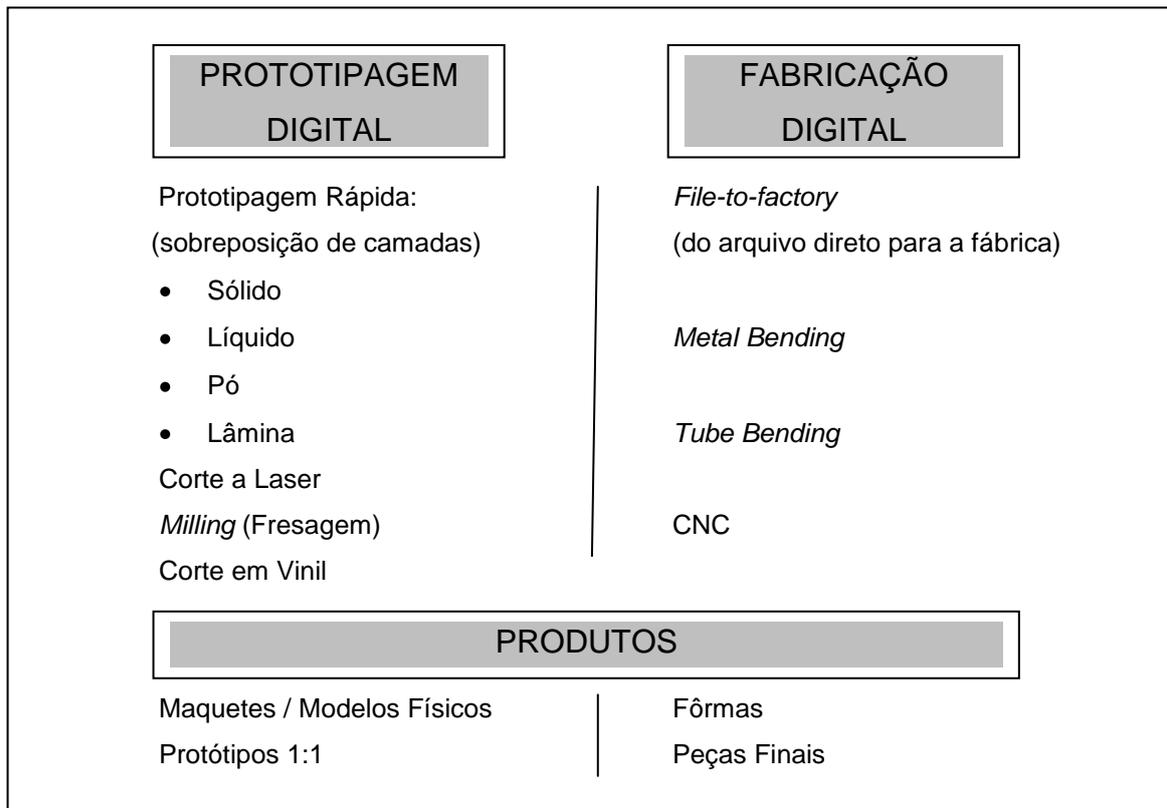
A fabricação digital possibilita solucionar os casos de produção que a indústria e o artesanato não conseguem resolver. Sendo assim, todos os meios de produção artesanal, industrial e de fabricação digital devem ser pensados e considerados pelos arquitetos como possibilidades existentes, de maneira a oferecer solução para a fabricação de produtos conforme suas diferenças e complementaridades.

5.1 A prototipagem rápida

A prototipagem rápida é conhecida como um dos processos que utiliza a tecnologia CAD/CAM, na produção de modelos físicos em escala reduzida, em diferentes tipos de materiais, antes que o artefato seja finalizado. Algumas técnicas de prototipagem rápida podem ser usadas para fabricação de componentes utilizando materiais de produtos acabados. Em escala de produção, os equipamentos CAD/CAM podem produzir componentes de construção em tamanho real. Estes podem, ainda, ser precisamente posicionados e montados no local da obra pelos projetistas de modelos digitais, com o auxílio de dispositivos eletrônicos e de levantamento (MITCHELL; McCULLOUGH, 1995, p. 417).

A prototipagem rápida e a fabricação digital são distinguidas e definidas, pelas autoras Pupo e Celani (2011), como os termos mais empregados recentemente na literatura, entre as diversas formas e técnicas de produção automatizadas em uso na arquitetura e construção. Em virtude das variadas definições e enfoques existentes, seguem abaixo os campos relacionados à utilização de cada um dos termos:

Quadro 3 - Campos de utilização de prototipagem rápida e fabricação digital



Fonte: Pupo; Celani, 2011, p. 471

O termo prototipagem rápida inclui todas as técnicas de sobreposição de camadas, corte a laser, fresas e corte com vinil, para produzir maquetes em escalas reduzidas e protótipos em escala (1:1). Por sua vez, o termo fabricação digital consiste em técnicas para produzir fôrmas ou peças finais de edifícios, com equipamentos CNC (PUPO; CELANI, 2011, p. 471).

Autores como Mitchell e McCullough (1995) definem o termo mais abrangente de prototipagem rápida, como sendo um método de tradução de modelos digitais tridimensionais do CAD, para processo de fabricação CNC de edificações.

Segundo alguns autores como Buswell et al. (apud PUPO; CELANI, 2011, p. 472), o termo prototipagem rápida refere-se somente ao processo de produção do protótipo por adição de material camada por camada, a partir de modelos gerados em sistemas CAD. Por fim, Ryder et al. (2002, p. 279-285) definem especificamente o termo como ferramenta de projeto e manufatura rápida, que serve para construir e testar fisicamente ideias de projeto, utilizando diferentes dispositivos de manufatura por adição de camadas, da Estereolitografia à Sinterização Seletiva a Laser (SLS) a impressões tridimensionais (3DP).

5.2 O modelo físico

No contexto arquitetônico, o modelo físico é tradicionalmente chamado de maquete. Por sua vez, a maquete enquanto modelo físico representado em escala reduzida de um projeto, em relação ao croqui, inclui a vantagem da tridimensionalidade (PINA et al., 2011, p. 109).

O modelo físico, quando representado em escala real (1:1), é chamado de *Mock-up*, ou ainda, de protótipo. Os protótipos físicos de projeto, na etapa inicial, incorporam as características essenciais do objeto final, que são as características formais e funcionais para serem avaliadas. Muitas vezes são incompletos ou minimamente definidos, utilizando-se materiais de baixo custo, com mínimo de tempo e esforço para atingir essas características (SCHODEK et al., 2005, p. 298).

As primeiras representações arquitetônicas de modelos em miniaturas foram produzidas pelas culturas neolíticas, com indícios arqueológicos datados por volta de 6.000 a.C. na Grécia, exemplo conhecido pelo modelo de Krannon. A partir daquele momento, com o modelo reduzido, o ser humano passou a ter a satisfação de sentir e pensar um mundo modelado nos limites de suas mãos (PINA et al., 2011, p. 110-111).

Tanto na arquitetura como no urbanismo a maquete é um meio muito utilizado pelos profissionais para elaborar e verificar uma ideia, conforme afirmam os autores:

A maquete estabeleceu novos conceitos com os avanços e complexidades programáticos, e é um caminho para configurar e dar forma a uma ideia, pois se pode criar e desenhar conjuntamente, registrar a imagem mental e iluminar o caminho. (PINA et al., apud KOWALTOWSKI et al., 2011, p. 115)

Em pesquisa realizada em 2008 por Kim e Maher, concluem que a interação direta com o uso das mãos promove a imersão do arquiteto no projeto, auxilia na cognição espacial, conseqüentemente possibilita o raciocínio lógico mais eficiente. A dinâmica do processo de fazer pensando e pensar fazendo, ou seja, a interação com a representação e o auxílio de artefatos é que faz o desenvolvimento do projeto evoluir e ser gradualmente compreendido (apud FLORIO et al., 2008, p. 7).

Além de auxiliar na visualização, os modelos físicos podem aprofundar a compreensão dos espaços, formas e sistemas construtivos projetados durante o processo criativo, por permitirem ser manuseados e até desmontados para revelar seu interior e seus componentes (FLORIO et al., 2008, p. 1).

Os modelos físicos possuem um papel importante para que o arquiteto apresente ao cliente o *feedback* do projeto, onde o produto é uma edificação. Os modelos permitem que a intenção do projeto seja adequadamente entendida, superando as limitações apresentadas pela transmissão de informações em desenhos técnicos bidimensionais (RYDER et al., 2002, p. 279).

Mills também aborda o uso do modelo físico manual, ou maquete de arquitetura, como parte essencial do processo de projeto. As maquetes são obtidas manualmente e com auxílio de instrumentos mecânicos. A sua função é gerar ideias de projeto e servir como veículo de aperfeiçoamento. Em sua obra, o autor não enfatiza o uso das maquetes de apresentação final, mas das maquetes com acabamentos simples e que materializam os esboços dos projetos (MILLS, 2007, p. 21-140).

Ainda, Mills classificou em dois grupos as maquetes, divididas e definidas conforme a necessidade e tipo de projeto: as maquetes primárias (preliminar, diagrama, conceito, volumes, cheios e vazios, desenvolvimento, apresentação ou maquete com acabamento) e as maquetes secundárias (sítio, urbanismo, paisagismo, interiores, seções, fachadas, estrutura, detalhe ou conexão). O uso da maquete no processo de projeto pode ser definido pelas seguintes funções (Ibid., p. 21-202):

- a possibilidade de observar concretamente a forma e o espaço físico tridimensional, pela sensação tátil, permitindo uma interação direta e a obtenção de um *feedback* imediato;
- a materialização, o que as condiciona às forças dinâmicas, condição inexistente nos desenhos bidimensionais;
- a previsão de comportamentos estruturais, para aperfeiçoamento do projeto e teste de sua integridade estrutural; e
- uma forma de comunicação precisa e poderosa junto aos clientes.

5.3 O protótipo rápido

As funções descritas anteriormente são inerentes às qualidades do modelo físico, gerado tanto manualmente quanto por meio da prototipagem rápida. Porém, produzindo-se o modelo com auxílio de recursos digitais, podem-se agregar outros importantes valores como a redução de tempo e maior precisão. Assim, a prototipagem rápida, em relação ao protótipo físico gerado manualmente, apresenta a vantagem de redução de tempo e da ausência da imprecisão gerada pela mão de obra humana, ou pelo uso de ferramentas manuais (BUSWELL et al., 2007, p. 224-231). O uso da prototipagem rápida pode também ser justificado pela complexidade formal arquitetônica (OLIVEIRA; FABRÍCIO, 2011, p. 456).

De maneira sintetizada, segundo Chua (apud FLORIO et al., 2008, p. 2), os protótipos rápidos podem desempenhar as seguintes funções durante o desenvolvimento do projeto: na fase de concepção do projeto, o protótipo rápido permite testar e provar as opções e ideias de projeto. Amplia os recursos de comunicação e interação, por meio da compreensão tátil entre os colaboradores, cliente e o próprio arquiteto. Permite, ainda, a experimentação e o aprendizado de soluções de problemas. Na fase mais adiantada de projeto, o protótipo rápido oferece recursos com maior precisão, para síntese e integração por meio da montagem de componentes. Por fim, por meio de planejamento e de execução, permite programar e produzir o projeto.

Schodek et al. (2005, p. 297-298) afirmam que não há uma mesma terminologia usada por todas as indústrias, mas os protótipos rápidos podem ser descritos pela maneira como eles são produzidos e como podem ser usados. Dessa

forma, eles podem ser definidos como protótipos experimentais e protótipos pré-produção.

Os protótipos experimentais são produzidos para testar uma ideia, durante o início ou no desenvolvimento do processo de projeto, e geralmente produzidos num processo mais rápido. Por outro lado, os protótipos pré-produção são produzidos para testar o projeto na etapa anterior à produção final, incorporando mais das qualidades “reais” necessárias para informar a equipe de engenharia e de produção. Por isso levam um tempo maior em relação aos protótipos experimentais, para serem elaborados. Geralmente, utilizam o mesmo processo de fabricação proposto, para alcançar a realidade mais próxima possível dos materiais e formas das partes finais do projeto.

No início do processo de projeto arquitetônico, a produção do protótipo experimental, que Ryder et al. (2002, p. 281-283) definem como modelo conceitual de protótipo, é um importante recurso para avaliar a forma estética do projeto. Quando feito para explorar o contorno e cuidados com a aparência formal, o protótipo pode, ainda, ser útil para explorar as questões ergonômicas do modelo. Alguns protótipos também podem servir como inspiração visual, durante o desenvolvimento de ideias e produtos (SCHODEK et al., 2005, p. 298).

Na figura abaixo, diferentes tipos de impressoras 3D, utilizadas para a produção de modelos pelo processo de adição:

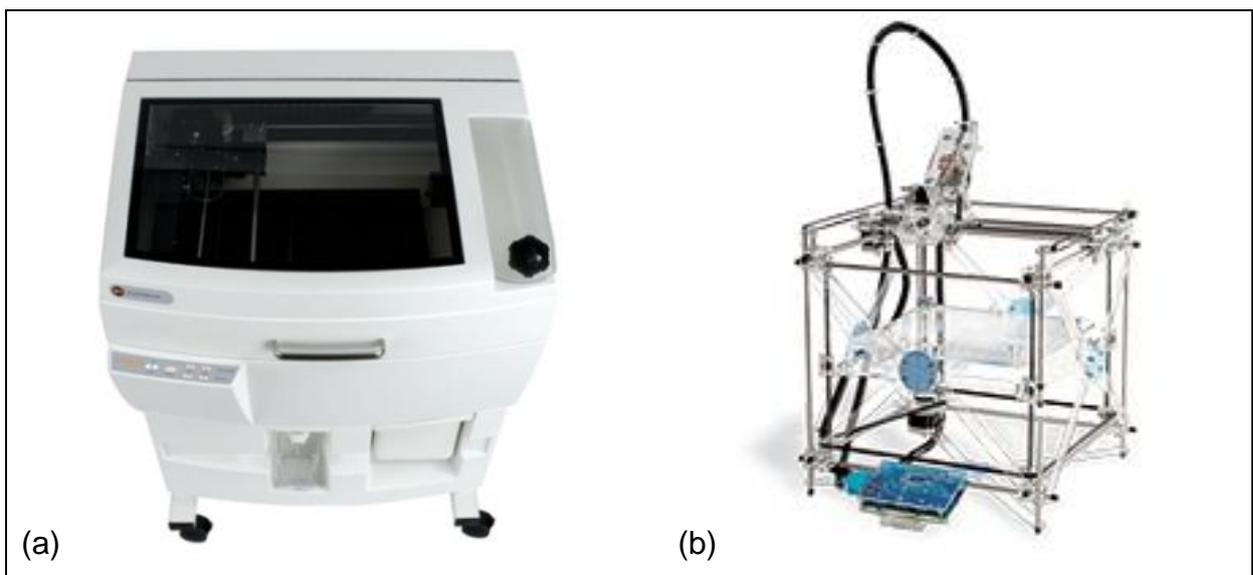


Figura 23 - (a) Impressora 3D, modelo ZPrinter 310 Plus, da Z Corporation; (b) Impressora 3D RapMan 3.1 Ultimate, da 3D Systems

Fonte (a): ZCorp, 2011

Fonte (b): TurboCAD, 2011

Nesta etapa inicial do processo de projeto, um modelo prototipado com menor precisão ou resistência atende aos requisitos. Os sistemas, por sua vez, devem oferecer rapidez e custo mais baixo na produção do modelo. Os exemplos de sistemas mais conhecidos para obter o modelo conceitual de protótipo rápido são os das empresas 3D System, Stratasys e ZCorporation, que trabalham com o processo por adição de camadas (RYDER et al., 2002, p. 281-283).

Segundo Matias, as impressoras tridimensionais (3DP) são baseadas em tecnologia *inkjet*, similar às impressoras jato de tinta e, por sua adequação aos ambientes de escritório, também são conhecidas como prototipagem rápida *desktop*.

Esse processo consiste na impressão de material aglutinante sobre uma camada uniforme de material em pó, promovendo a sua ligação e formando, após várias etapas de impressão, as diversas camadas que constituem o modelo. Cada gota de material aglutinante une o material em pó subjacente, criando um ponto de material unido. Estes pontos unem-se entre si por sobreposição. O material unido forma a peça, enquanto o restante do material cumpre a função de suporte. Após a construção do protótipo, este é retirado da máquina e pode receber a aplicação de um material adequado, com a finalidade de melhorar a sua resistência mecânica.

O mesmo autor descreve ainda as principais vantagens do processo de impressão tridimensional, como o pouco tempo para construção do protótipo, os materiais utilizados com baixo custo e atóxicos e, ainda, a praticidade para utilizar o equipamento dentro do ambiente de escritório. Cita como desvantagens o pouco acabamento superficial do modelo, as propriedades mecânicas inferiores em relação a outros processos e, por último, as pequenas dimensões para prototipagem (MATIAS, 2007, p. 11-13).

Os autores Oliveira e Fabricio (2011, p. 462) complementam as vantagens e desvantagens desse processo. Mencionam que no caso das impressoras tridimensionais, além do fato dos protótipos produzidos apresentarem relativa fragilidade, precisam de um dimensionamento mínimo e pós-processamento com a peça. Porém, salientam que o modelo produzido pode ser exatamente igual ao arquivo digital enviado à impressão, o que gera liberdade de criação formal.

Wohlens também classifica os modeladores conceituais de protótipo rápido (*concept modeler*) como aqueles que devem ser usados nas fases iniciais do projeto. As características físicas de um modelo definem sua qualidade e determinam o sucesso ou a limitação da tecnologia aplicada. Atualmente, muitas

dessas tecnologias são utilizadas apenas na visualização de peças e protótipos, ou seja, sem um compromisso funcional, por não terem a preocupação com a resistência e a precisão. Esses modeladores conceituais destinam-se a diversas análises, como túneis de vento, estudos de iluminação natural e identificação de erros de *design*, nas primeiras fases do projeto (WOHLERS, 2008 apud PUPO; CELANI, 2011, p. 473).

Na etapa final do processo de projeto, o protótipo pré-produção, que Ryder et al. (2002, p. 282-283) definem como protótipo rápido, é usado para verificar encaixes e montagem. Quando utilizado como protótipo funcional, demonstra como algo pretende trabalhar, por exemplo, utilizando um modelo de um mecanismo (SCHODEK et al, 2005, p. 298).

Segundo Ryder et al. (2002, p. 281-285), para obter o protótipo pré-produção, na etapa final do projeto, um nível básico de precisão é necessário. Alguns dos sistemas usados para obter o modelo conceitual de protótipo ainda são capazes de produzir modelos precisos o suficiente para tal fim. Entretanto, os sistemas de prototipagem rápida mais usados para obter o padrão de precisão para encaixe são a Estereolitografia (SLA), a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), a Modelagem de Objeto Laminado (LOM) e a Modelagem por Deposição e Fusão (FDM). Estas tecnologias oferecem maior precisão e uma gama mais ampla de materiais funcionais.

A produção de um modelo de projeto depende do uso de equipamentos, que permitam gerar partes que possam ser agrupadas ou montadas com precisão e, se possível, integralmente utilizadas para testar o produto. Isto somente é alcançado se forem utilizados os sistemas de prototipagem rápida mais avançados, que apresentam maior precisão, acabamento e resistência.

Todos esses processos de adição, incluindo a impressão tridimensional (3DP), Sinterização Seletiva a Laser (SLS), Modelagem por Deposição e Fusão (FDM), Estereolitografia (SLA) e Modelagem de Objeto Laminado (LOM), consistem em sobrepor sucessivas camadas de material, até que o objeto seja formado. Para que isso ocorra, o *software* do sistema de prototipagem “fatia” horizontalmente o modelo digital. Conforme o material de cada tipo de equipamento, cada camada é colada uma sobre a outra (PUPO, 2008, p. 9).

A seguir, imagens de equipamentos de alta resolução para prototipagem rápida:

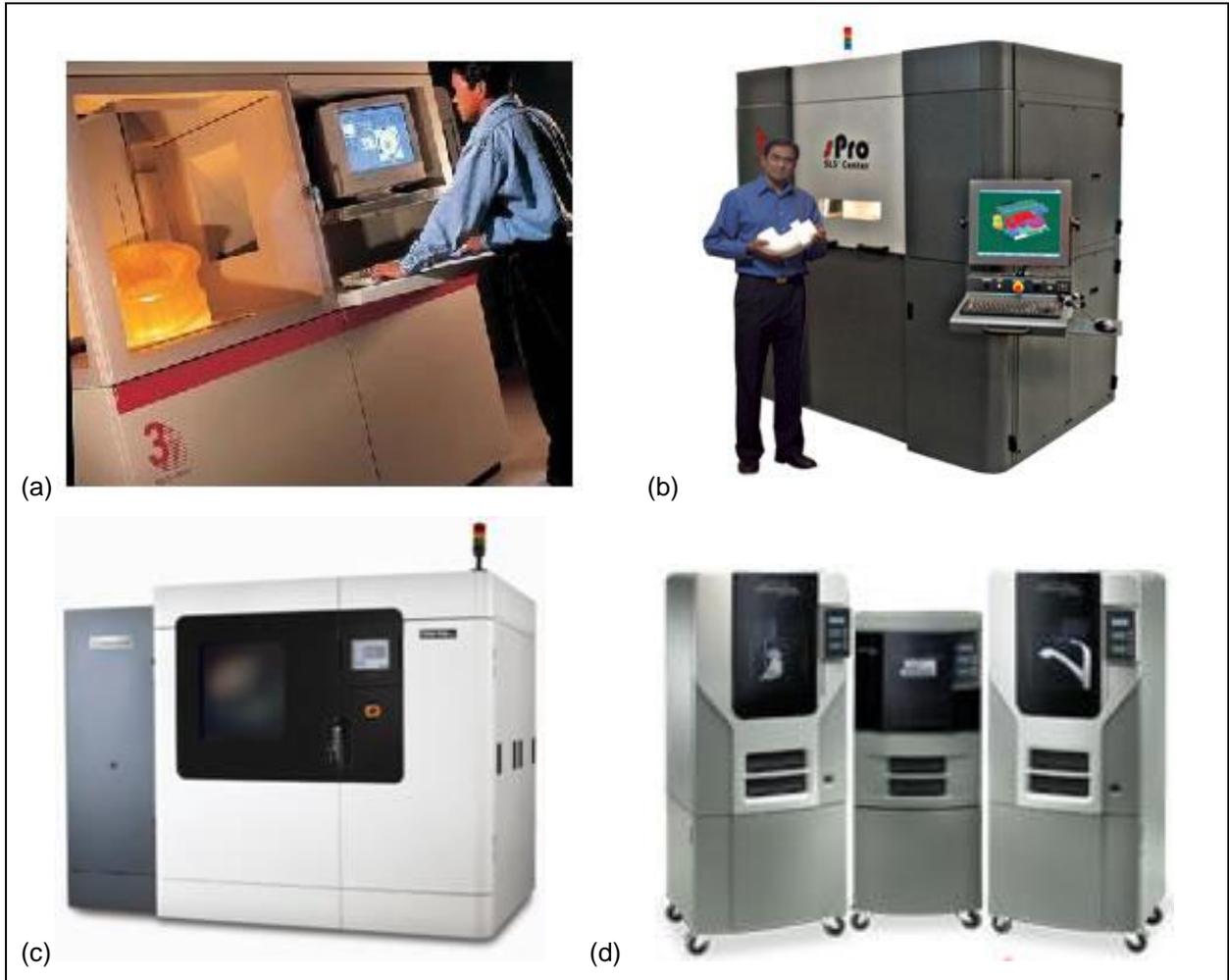


Figura 24 - (a) Equipamento de estereolitografia (SLA); (b) Sinterização seletiva a laser (SLS); (c) Equipamento de modelagem de objeto laminado (LOM); (d) Modelagem por deposição e fusão (FDM)

Fonte (a): Arpiadesign, 2011

Fonte (b): 3DSystems, 2011

Fonte (c): Sisgraph, 2011

Fonte (d): Stratasys, 2011

A figura 25, a seguir representa todas as fases referentes ao processo de prototipagem rápida por adição de camadas: Inicia com o modelo virtual produzido por um sistema CAD, que por sua vez também permite gerar o arquivo STL correspondente. No *software* do equipamento de prototipagem, o arquivo STL é importado e preparado de maneira que planos fatiam o modelo. Na intersecção dos planos com o modelo, uma fatia contendo as medidas e coordenadas é gerada para o equipamento poder reconstruir o volume, sobrepondo camada por camada, até obter o modelo completo fisicamente.

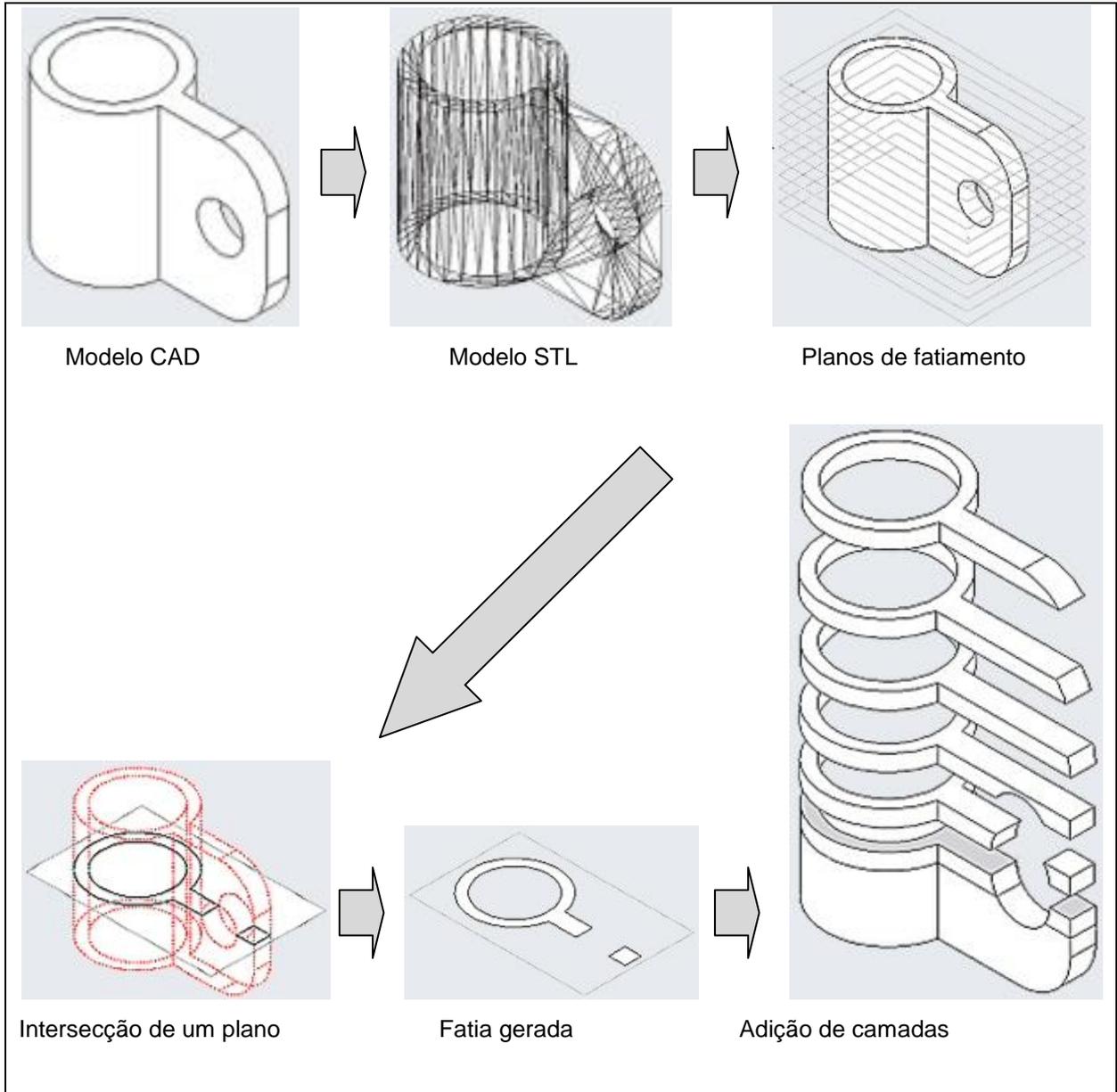


Figura 25 - Fases do processo de prototipagem rápida por adição de camadas

Fonte: CIMJECT, 2012

Em relação aos tipos de prototipagem digital, o protótipo experimental possui o foco na concepção e desenvolvimento de projeto, enquanto que o protótipo pré-produção concentra-se na condição de execução final do trabalho. Isto implica diretamente no nível de precisão e tipo de material relacionado ao equipamento, a ser definido para produção do protótipo rápido. O projetista necessita conhecer as capacidades técnicas de cada equipamento, de maneira a obter o produto com as características desejadas, para evitar o aumento de custos e de tempo.

Para melhor entendimento sobre os dois diferentes protótipos rápidos, segue abaixo o quadro contendo de maneira esquemática as características, os diferentes tipos de uso na arquitetura e as respectivas tecnologias mais utilizadas.

Quadro 4 - Comparações entre os tipos de prototipagem digital

PROTOTIPAGEM DIGITAL			
TIPOS	CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÃO	PROCESSOS
<p>PROTÓTIPO EXPERIMENTAL (Etapa Inicial de Projeto)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Escala Reduzida • Menor Precisão • Menor Tempo • Menor Custo 	<ul style="list-style-type: none"> • Experimentação e aprendizado de soluções de problemas • Testar e provar ideias • Comunicar e interagir por compreensão tátil • Análises ambientais e formais 	<p><u>Por Adição:</u> 3D Printer FDM</p> <p><u>Por Corte 2D:</u> Corte a Laser Corte em Vinil</p> <p><u>Por Subtração:</u> Fresagem (pouco utilizada)</p>
<p>PROTÓTIPO PRÉ-PRODUÇÃO (Etapa Final de Projeto)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Escala Reduzida e 1:1 • Maior Precisão • Maior Tempo • Maior Custo 	<ul style="list-style-type: none"> • Síntese e integração por montagem de componentes • Programar e planejar a produção • Produzir o projeto 	<p><u>Por Adição:</u> 3DP FDM SLS SLA LOM</p> <p><u>Por Corte 2D:</u> Corte a Laser Corte em Vinil</p> <p><u>Por Subtração:</u> Fresagem</p>

Fonte: Autoria nossa

Para que o arquiteto possa comparar as informações referentes às diferenças de custo e tempo, para elaboração da modelagem convencional e a modelagem digital, os autores Ryder et al. (2002, p. 283-287) pontuam os principais parâmetros para definir o tipo de modelagem do projeto arquitetônico, que são: a escala, o tamanho, o custo, o tempo, os materiais, a complexidade e a precisão. O quadro abaixo descreve estes diferentes parâmetros, relacionados com os diferentes tipos de modelagem arquitetônica:

Quadro 5 - Comparações entre prototipagem rápida (PR), modelo virtual (MV) e às etapas de modelagem convencional

	Viabilidade	Planejamento	Final	PR	MV
Escala	1:200 1:500	1:200 1:500	1:200 1:500	1:200 1:500	1:1
Tamanho	250x 250x 250	250x 250x 250	250x 250x 250	Depende da Tecnologia	Como Modelado
Custo	£`s*	£ 10`s*	£ 1000`s	£ 100`s/ 1000`s	£ 100`s/ 1000`s
Tempo	Horas	Dias	Meses	Horas/ Dias	Horas/ Dias/ Semanas
Materiais	Papelão, Plástico	Papelão, Madeira, Plástico	Madeira, Plástico, Tecido	Polímeros, Papelão	N/A
Complexidade	Baixa	Média	Alta	Alta	Como Renderizado
Precisão	Baixa	Média	Alta	Alta	Como Modelado

Fonte: Ryder et al., 2002, p. 289 (tradução nossa)

Os modelos virtuais e os protótipos rápidos, os quais Schodek et al. (2005, p. 298) definem como protótipos digitais e físicos, juntos oferecem meios de compreensão para testar e analisar virtualmente todas as características da proposta de um projeto. Isto permite ao arquiteto considerar desde o início os métodos para a modelagem em um ambiente digital que, na etapa final, deverão ser usados para a sua fabricação.

Em relação aos modelos virtuais, os modelos físicos possuem uma aplicação mais adequada quando há necessidade de uma percepção tátil. Eles são facilmente transportáveis e não são dependentes de *hardware* para apresentação. No entanto, no caso de alterações no projeto, precisam ser reconstruídos. Geralmente, os modelos construídos em uma escala menor que a real (1:1) resultam na perda de certos detalhes do projeto, e isto deve ser considerado, dependendo de qual for o objetivo de uso do modelo (RYDER et al., 2002, p. 289).

A capacidade de 'imprimir' modelos de projetos influenciará muito a forma como projetistas de todos os tipos, de *designers* de produto a projetistas de arquitetura, conduzem os seus processos de projeção. (Ibid., p. 290, tradução nossa)

Segundo Schodek et al. (2005, p. 297), os protótipos rápidos e modelos digitais têm sido parte integrante do processo de projeto. Essas tecnologias digitais são utilizadas durante diferentes etapas do desenvolvimento do projeto, e os

processos de produção são considerados para desenvolver e testar ideias e métodos. Com o auxílio das ferramentas de manufatura digital, o modelo físico é produzido com precisão e no tempo conveniente, além de permitir ampliar a gama de técnicas disponíveis, para fazer os protótipos em uma variedade de materiais que atendam às diferentes necessidades de projeto.

5.4 O processo de prototipagem rápida na arquitetura

O processo de prototipagem rápida, para Pupo e Celani (2011), começa a partir de um arquivo de modelo digital gerado em qualquer sistema CAD tridimensional, ou por digitalização tridimensional do objeto a ser prototipado. Ainda dentro do sistema CAD, o arquivo do modelo virtual deve ser exportado para ser interpretado pelo sistema do equipamento de impressão 3D - o formato mais usual é o STL (*stereolithography*).

Em sequência, o procedimento consiste em verificar a integridade do arquivo exportado do sistema CAD - por exemplo o formato STL; definir os suportes para o modelo, quando for o caso; definir parâmetros como escala, tempo de execução, posição e orientação do objeto e “fatiar” em camadas no sentido horizontal, para então ser encaminhada à etapa de fabricação. A produção de cada modelo depende da maneira específica que cada sistema sobrepõe camada por camada, solidificando o objeto produzido.

A última etapa, o acabamento, consiste na pós-produção do modelo, que dependendo da tecnologia do equipamento, exige o lixamento, o polimento, a resinagem ou pintura da peça. As autoras Pupo e Celani (*Ibid.*, p. 477) consideram ainda que, além do projeto de arquitetura, as tecnologias para fabricação digital de protótipo requerem um projeto exclusivo para produção do modelo, no qual todos os parâmetros e variáveis devem ser considerados para o resultado satisfatório do protótipo.

O quadro a seguir apresenta as etapas gerais do processo de prototipagem rápida, por meio da técnica de adição. Neste caso, as etapas são sempre as mesmas, e o que pode variar são os materiais, o tempo de impressão e o tipo de acabamento:

Quadro 6 - Etapas gerais do processo de prototipagem rápida por adição de camadas



Fonte: Volpato et al., 2007, apud Pupo; Celani, 2011, p. 473

Nesse sentido, Mills (2007, p. 188) apresenta o exemplo do escritório americano Morphosis, fundado pelo arquiteto Thom Mayne, um dos pioneiros no uso de equipamentos de prototipagem rápida dentro do próprio *atelier*. Segundo o entendimento desses arquitetos, o processo se inicia com a criação de modelos virtuais volumétricos e de conceito, diretamente no computador, como a melhor forma de acelerar a exploração das opções de projeto. A partir do modelo digital, vários pequenos protótipos rápidos são elaborados para estabelecer uma troca de informações, em processo de “vai e vem”, resultando em modificações a serem realizadas no modelo virtual. Dessa maneira, formas difíceis de serem executadas manualmente, com curvas complexas e superfícies reversas, podem ser exploradas com confiança e controle.

A Figura 26 apresenta fotos do Protótipo Rápido produzido a partir da impressora tridimensional da ZCorp modelo 310, pelo processo de adição por camadas de jato de pó, do projeto feito para o concurso do Instituto Politécnico de Rensselaer.

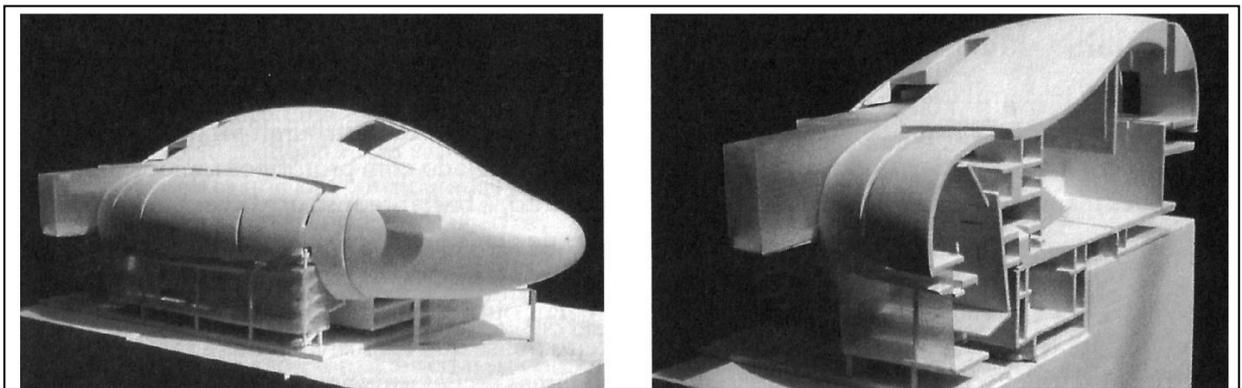


Figura 26 - Protótipo rápido do projeto do Edifício de Artes Dramáticas e Mídia Eletrônica do Instituto Politécnico de Rensselaer, Morphosis, EUA

Fonte: Mills, 2011, p. 189

Conforme a experiência do escritório Morphosis nesse processo, a prototipagem rápida permite explorar com liberdade volumes que, na modelagem física manual, não seriam possíveis de serem representados. Outra opção importante em relação ao uso do protótipo digital é a produção de detalhes, de parte

do projeto, em tamanho real para análise. O escritório também utiliza o protótipo como um poderoso instrumento de comunicação com os clientes, e ainda produz diferentes estudos em escala e em seções, em pouco tempo e custo adicional. O *software* adotado pela equipe para modelagem é o Triforma, que possui interface direta com o *software* Microstation (Mills, 2007, p. 188-189).

6 INTEROPERABILIDADE

A interoperabilidade pode-se citar em contexto mais amplo como a “habilidade de dois ou mais sistemas de interagir e de intercambiar dados de acordo com um método definido, de forma a obter os resultados esperados” (ISO). Resulta em protocolos e padrões de comunicação que devem ser adotados para melhorar a comunicação entre estas partes. Kunze (2009, p. 39) esclarece ainda, de que maneira este processo pode acontecer:

Os processos de interoperabilidade acontecem, principalmente, em ambientes controlados, onde existe a possibilidade de definir padrões ou linguagens comuns de troca de dados e informações. Esses padrões são definidos, num contexto nacional, pelo governo e entidades encarregadas dos processos de normatização. Normalmente esses padrões se baseiam em padrões internacionais e abertos. Tanto o governo, a iniciativa privada e o terceiro setor devem seguir esses padrões. (Ibid., p.40)

Os benefícios da interoperabilidade são citados por Santos (apud KUNZE, 2009, p. 51) como uma maior interconexão em vez de soluções isoladas, redução dos custos de transação, aumento da participação dos agentes envolvidos e melhor acesso a mais informações, possibilitando a resolução mais rápida dos problemas.

O governo brasileiro, por meio da arquitetura ePING (Padrões de Interoperabilidade de Governo Eletrônico), definiu um conjunto mínimo de premissas, políticas e especificações técnicas que regulamentam a utilização da Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC), na interoperabilidade de Serviços de Governo Eletrônico, estabelecendo as condições de interação com os demais Poderes e esferas de governo, e com a sociedade em geral (BRASIL, 2006, p. 4).

A visão da arquitetura ePING é voltada para aspectos de Tecnologia da Informação, no qual o foco destes padrões de interoperabilidade está relacionado a aspectos de interoperação, basicamente entre equipamentos eletrônicos (ITS).

Na área da arquitetura, engenharia e construção, o tema interoperabilidade ganhou relevância entre os profissionais da área de projeto, a partir do aumento do uso das ferramentas BIM (*Building Information Modeling*). Segundo Eastman et al. (2008), isso se deve ao fato da interoperabilidade, juntamente com a modelagem paramétrica, ser considerada um dos fundamentos para o uso de sistemas BIM.

6.1 Tipos de formatos

Entre as décadas de 1970 e 1980, tornava-se aparente a necessidade de transferência de informações entre *softwares* de projetos, de documentação e de análises. A Agência Espacial Americana - NASA, após constatar os elevados custos com tradutores entre todas as empresas que desenvolviam sistemas CAD, exigiu que as mesmas concordassem em criar um formato de transferência de dados, que fosse de domínio público. O resultado foi a criação do formato padrão IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*). A princípio, este formato possibilita que cada empresa de *software* desenvolva apenas dois tradutores para a exportação e importação, a partir da sua aplicação, a invés de desenvolver um tradutor para cada par de matrizes do programa (Ibid., p. 66).

Ainda segundo Eastman, a transferência de dados entre dois aplicativos pode ocorrer de quatro maneiras distintas:

- de maneira direta, fornece uma conexão integrada entre os dois aplicativos. Existem todos os níveis de interface de programação, como as linguagens C e C++. As interfaces permitem que parte do aplicativo do modelo da edificação seja acessível, para operações como criação, exportação, modificação ou eliminação;
- entre o formato de arquivo registrado de *softwares* específicos, com prioridade na troca de informações geométricas. O formato é desenvolvido por uma organização comercial, para fazer a interface aplicada à própria empresa. Os exemplos de formatos conhecidos são DXF (AutoCAD), STL (Estereolitografia), 3DS (3D Studio Max), entre outros. Cada um desses formatos aborda as capacidades funcionais específicas para seus próprios fins;
- por meio de formato de exportação de domínio público, envolvendo o uso de modelos de construção em padrão aberto, representados pelos formatos IFC (*Industry Foundation Classes*) ou CIS/2 (*CIMSteel Integration Standards*) como as principais opções. Além da geometria, estes formatos transportam as propriedades e materiais do objeto, além das relações entre os mesmos;
- entre formatos com padrão XML, que é uma extensão do HTML, a linguagem base da *Web*. Este formato permite definir a estrutura e significados de algumas informações de interesse. As diferentes estruturas,

chamadas de “*schema*”, do padrão XML, suportam a transferência de muitos tipos de dados entre as aplicações.

Na área de arquitetura e construção civil, os formatos de transferência de informação de superfícies e formas tridimensionais geralmente utilizadas são: 3DS, WRL, STL, IGS, SAT, DXF, DWG, OBJ, DGN, PDF (3D), XGL, DWF, U3D, IPT, PTS. Estes formatos variam conforme os tipos de superfícies e linhas representadas, de acordo com a necessidade ou não de representação de sólidos, segundo as propriedades dos materiais ou, ainda, segundo a necessidade de apresentação de informações, a partir de diferentes pontos de vista.

Todos os métodos de interoperabilidade devem considerar a questão das versões de cada *software*. Quando o aplicativo é atualizado com novas operações, isso pode acarretar em defeito no mecanismo de transferência. Desta forma, caso não sejam mantidas as versões do padrão, estas não serão bem gerenciadas (Ibid., 2008, p. 69-70).

Em 1995, a indústria da construção passou a contar com a contribuição da IAI (*International Alliance for Interoperability*), atualmente conhecida como *BuildingSMART – International home of openBIM*, para o desenvolvimento de um modelo de objetos. O IAI foi o organismo responsável pela criação da extensão de arquivo IFC (*Industry Foundation Classes*), que possibilita o compartilhamento de informações de projeto, através do seu desenvolvimento e em aplicações técnicas. As extensões IFC são públicas, abertas para implementação e para o uso de qualquer membro, e ainda podem ser desenvolvidas a qualquer tempo (JACOSKI; LAMBERTS, 2012, p. 3).

Este formato de extensão geralmente é utilizado para interação de informações geradas em *softwares* BIM com os *softwares* de simulação, possibilitando inúmeras vantagens, conforme citam Bazjanac e Crawley (1997 apud JACOSKI; LAMBERTS, 2012, p. 4) entre elas: interagir entre os arquivos diretamente e instantaneamente; distribuir e transferir informações de interesse comum; acesso sem custos para uso de dados geométricos e outros; redução no custo de projeto de simulação; e acréscimo e melhor uso dos resultados de simulação e análise.

No sentido de que o modelo gerado com o uso dos sistemas BIM consiga integrar as etapas de projeto, é necessária a solução dos problemas de falta de interoperabilidade. Jacoski e Lamberts (2012) mencionam que, mesmo com a

significante contribuição no processo, as ferramentas computacionais ainda carecem de solução às repetidas interrupções e perdas de produtividade na elaboração de projetos.

Até o momento, os motivos que tornam a interoperabilidade e a colaboração na indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) pouco bem-sucedidas são, por um lado, a falta de entendimento entre os profissionais (AECO) sobre os benefícios da interoperabilidade para o processo de projeto e construção. Por outro lado, observa-se o fato da viabilidade de transferência integral de dados entre os softwares resultar em desinteresse por parte das empresas desenvolvedoras, por não condicionar as empresas parceiras na utilização de pacotes de *softwares* de um mesmo desenvolvedor (ANDRADE; RUSCHEL, 2011, p. 431-432).

Os autores Andrade e Ruschel (Ibid., p. 435) sugerem uma alternativa para aumentar a interoperabilidade dos aplicativos BIM, com o uso das tecnologias de portais *web*:

O uso do portal BIM *web* como repositório central, baseado num padrão de informação global, aberto e interoperável, pode possibilitar a redução de perdas e sobreposições de dados gerados na indústria da AECO. Com isso, estimula-se um ambiente de colaboração internacional entre diferentes equipes de projeto, com alto nível de interoperabilidade e em tempo real.

Os portais BIM *web* são tecnologias de suporte para uma prática de projeto integrado. O surgimento desses portais tem permitido a melhoria significativa da produtividade no processo de projeto, construção e gestão de edifícios. Eles têm sido usados por muitas organizações para conseguir ganho de desempenho nos seus processos de projeto e construção do edifício, com um maior envolvimento de pessoas no uso de ferramentas computacionais. Um exemplo de portal BIM *web* é o Onuma Planning System (OPS), desenvolvido pela empresa norte-americana Onuma Inc. (Ibid., p. 434-435).

6.2 O formato STL

Segundo Ryder et al. (2002, p. 280), em todos os setores das indústrias a interoperabilidade entre os sistemas digitais ocorre com uso do arquivo

tridimensional no formato padrão STL (estereolitografia), para obtenção do prototipo rápido. Geralmente, os sistemas CAD tridimensionais incluem a opção de exportação no formato STL. As impressoras tridimensionais, por sua vez, geralmente importam os arquivos com extensão STL. Outra vantagem desse formato é o fato de ser um padrão não proprietário, ou seja, um padrão aberto, que não possui domínio de uma única empresa comercial.

Em alguns poucos *softwares* CAD, além do formato STL, é possível exportar o arquivo do modelo direto para o formato padrão do sistema de prototipagem. No sentido de delimitar o objeto desta pesquisa, devido à exiguidade de tempo e recursos, o formato STL no padrão binário será o formato padrão adotado, para efeito de estudo de interoperabilidade entre diferentes tipos de sistemas CAD e as impressoras tridimensionais. A seguir, o formato STL será descrito com mais detalhes, para melhor compreensão do funcionamento deste formato padrão.

O padrão STL é um formato de arquivo desenvolvido pela empresa 3D Systems, em 1987. Tornou-se amplamente utilizado nos processos de fabricação por adição, por ser considerado simples e suportado por vários pacotes de sistemas CAD (FRANCISCO, 2010, p. 9).

Segundo Ryppl e Bittnar (2005, p. 1), um arquivo STL é a representação de uma geometria de superfície tridimensional com base em faces triangulares. A superfície é tramada em um conjunto de triângulos facetados, e cada face é descrita pela unidade exterior dos três pontos que representam cada vértice do triângulo. O tamanho das faces é conduzido pela tolerância que controla a qualidade da representação da superfície, ou seja, a distância entre as faces dessa superfície. Cada arquivo STL é produzido com diferentes graus de tolerância, o que é definido pelo tipo de equipamento e por sua capacidade de resolução e precisão.

Neste formato, segundo Matias (2007, p. 4), a geometria do modelo CAD é descrita através de uma malha envolvente de triângulos, que do ponto de vista matemático constitui a forma polinomial mais simples de descrição de uma superfície. O arquivo contém o sistema tridimensional de coordenadas cartesianas (x,y,z) dos nós de cada triângulo, bem como a respectiva normal exterior. As demais entidades que descrevem a representação de cor, textura ou outros atributos comuns ao modelo, são ignoradas na criação do arquivo STL.

O formato STL especifica ambas as representações ASCII e binário. No caso do padrão ASCII, cada triângulo é identificado pelas coordenadas dos três

vértices, definidos no sentido anti-horário, e pela normal exterior a cada triângulo. No caso de não estar definido, o vetor unitário é gerado de forma automática pela maioria dos *softwares* existentes, conforme representação da figura abaixo:

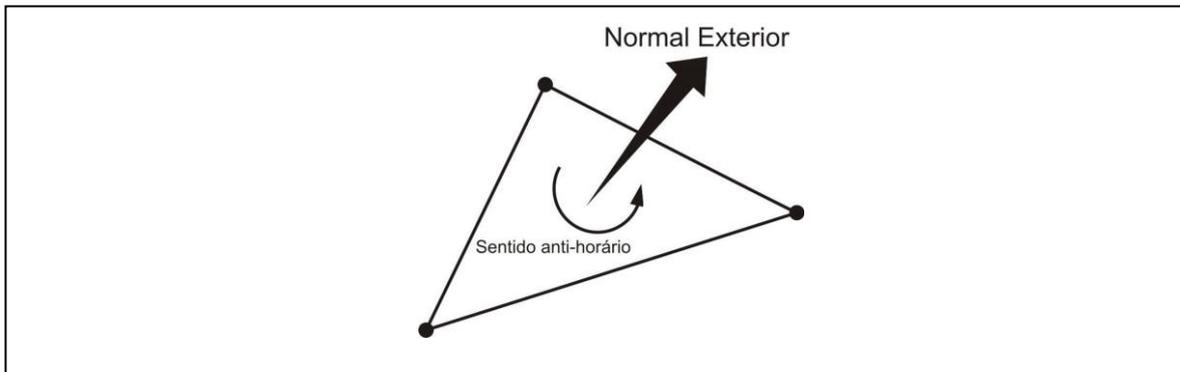


Figura 27 - Representação da normal e dos vértices de cada triângulo no arquivo STL em ASCII
Fonte: Fabbers apud Francisco, 2010, p. 10

O arquivo STL em ASCII é escrito começando pela palavra *solid*, seguida do nome do arquivo, e termina com a palavra *endsolid*. A definição de cada triângulo começa com a palavra chave *facet* e termina com a palavra *endfacet*. Cada vértice é descrito num registro *vertex* com suas coordenadas (x, y, z). A definição dos vértices de cada triângulo é feita por meio de um ciclo iniciado com a palavra chave *outer loop* e finaliza com a palavra *endloop*, como descrito na figura abaixo:

```

solid nome (name)
facet normal x y z
    outer loop
        vertex x y z
        vertex x y z
        vertex x y z
    endloop
endfacet
endsolid nome (name)

```

Figura 28 - Estrutura de um arquivo STL em ASCII

Fonte: Fabbers apud Francisco, 2010, p.10

O formato STL binário é menor que o arquivo correspondente em ASCII, e muitas vezes pode ser adotado como opção corrente (*default*) pelos sistemas CAD, para exportar o arquivo do modelo. O formato binário utiliza inteiros e vírgulas flutuantes, para a representação numérica da malha triangular. Os primeiros 84 bytes são destinados ao cabeçalho e para cada triângulo existente são ocupados

mais 50 bytes com as coordenadas (x, y, z) do vetor da normal e dos três vértices, conforme representado na figura abaixo:

Bytes	Descrição
80	Cabeçalho (Ignorado)
4	Número de triângulos
Para cada triângulo	
4	Componente x da normal
4	Componente y da normal
4	Componente z da normal
4	Coordenada x do vértice 1
4	Coordenada y do vértice 1
4	Coordenada z do vértice 1
4	Coordenada x do vértice 2
4	Coordenada y do vértice 2
4	Coordenada z do vértice 2
4	Coordenada x do vértice 3
4	Coordenada y do vértice 3
4	Coordenada z do vértice 3
2	Bytes livres

Figura 29 - Estrutura de um arquivo STL binário

Fonte: Fabbers apud Francisco, 2010, p. 11

Segundo Bártolo (apud FRANCISCO, 2010, p. 11), para uma definição correta de uma rede de elementos triangulares, é preciso seguir três regras. A regra de orientação dos triângulos, na qual a orientação dos vértices de cada triângulo deve seguir o sentido anti-horário. Na segunda regra, adjacência, cada triângulo deve partilhar dois vértices do triângulo adjacente. Por último, no caso de triângulos adjacentes, a direção de um lado de um triângulo é oposta à direção do mesmo lado no triângulo adjacente - regra de Mobius. Quando estas regras não são seguidas para gerar o formato padrão STL, problemas no momento da preparação do modelo para prototipagem podem ser detectados (RYPL; BITTNAR, 2005, p. 2).

6.3 A interoperabilidade CAD/CAM

No caso da interoperabilidade entre os sistemas CAD/CAM, por se tratar de sistemas distintos entre si, também precisam transferir as informações geradas de um *software* para outro, para tornar viáveis as operações entre os mesmos. É importante relembrar o conceito de interoperabilidade, como sendo a capacidade de comunicação de dados entre diferentes sistemas, que retrata a necessidade de

transmitir dados entre aplicativos, contribuindo para a redução do trabalho manual entre os vários tipos de especialidades (EASTMAN et al., 2008, p. 65).

Muitos podem ser os problemas que impedem a interoperabilidade entre os sistemas CAD/CAM, desde o uso de diferentes sistemas de *softwares*, diferentes versões dos produtos ou comunicação inconsistente entre projeto e manufatura. No entanto, os problemas predominantes de interoperabilidade são devidos à falta de qualidade dos modelos CAD. Estes podem apresentar defeitos topológicos ou geométricos que não são visíveis ao usuário. Alguns desses defeitos podem ser provenientes dos próprios *softwares* de modelagem (McKENNEY, 1998, p. 2).

6.4 A qualidade do modelo CAD

Os problemas de qualidade do modelo, para McKenney (Ibid., p. 3-5) podem ser classificados em três áreas: precisão, estrutura e realismo. Os requisitos de precisão colocam limites para os tamanhos mínimos entre as entidades geométricas (arestas, vértices e faces). Os modelos extremamente precisos requerem estruturas de dados grandes e complexas. Para defini-los com as formas complexas, necessitam de espaçamento de arestas e faces menores.

Os modeladores de sólidos usam tolerâncias diferentes para calcular o desvio máximo permitido entre as entidades topológicas, e as falhas na geometria podem ser difíceis de serem vistas em imagens sombreadas ou em linhas ocultas do modelo. Ainda, a tradução dos dados da geometria entre os *softwares* pode falhar - no caso, as tolerâncias máximas permitidas entre as superfícies e bordas na exportação apresentam-se maiores do que as dos *softwares* de importação. Ainda, problemas estruturais incluem inconsistências na orientação de *loop*, ausência de geometria e auto-intersecção de geometria. Estes erros podem determinar comportamentos imprevisíveis nos *softwares*, como a execução de tarefas equivocadas ou até mesmo a paralisação total do funcionamento do sistema.

Por fim, os problemas de realismo da reprodução do modelo CAD em modelo físico acontecem quando as fendas definidas no modelo sólido, dependendo do seu tamanho mínimo, não podem ser estendidas completamente até o objeto. O sistema gera outras pequenas faces alongadas para corrigir o fechamento das

superfícies, com maior dimensão em um modelo, ou até com faces de ângulo muito agudo entre os cantos de um vértice (Ibid., p. 6-7).

Em pesquisa sobre os erros mais comuns que surgem na malha de modelos CAD, Veleba e Felkel (2007, p. 1), descrevem algoritmos para detecção e correção dos erros, e apontam os problemas por meio de duas abordagens por processamento de malha direta e processamento de malha *voxelized*.

Os erros de malha são definidos em: rachaduras (*cracks*), buracos, articulações em "T", sobreposições, paredes soltas, geometria duplicada, auto-intersecção, orientação inconsistente da normal, polígonos invisíveis, faces degeneradas e erros de cavidades. As Figuras 30 a 33 apresentam algumas ilustrações com exemplos destas falhas, que podem ocorrer no modelo CAD.

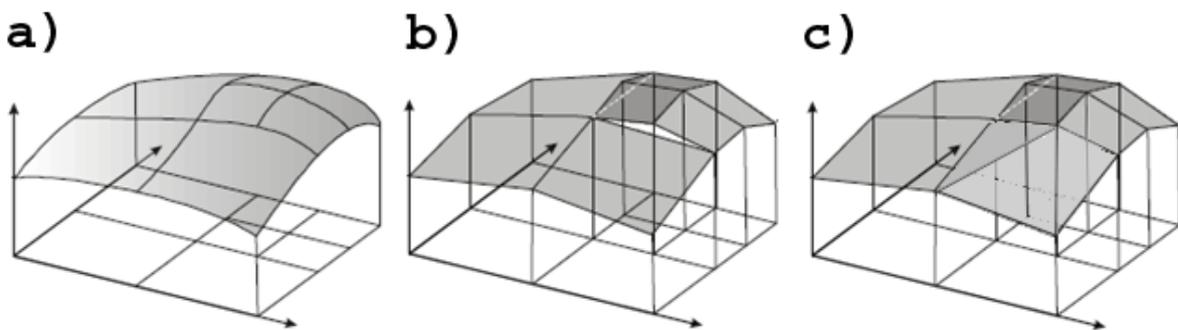


Figura 30 - Exemplo de rachadura (*crack*): (a) superfície lisa; (b) superfície representada por faces planas; (c) superfície com faces planas corrigidas

Fonte: Veleba; Felkel, 2007, p. 2

Para visualizar o problema de rachaduras no modelo, geralmente o usuário precisa acionar a opção de comando, dentro do *software* de sistema CAD, com alta resolução - por exemplo, o *render*. Para evitar o tipo de problema "crack", na construção de superfície do modelo, o usuário deve aumentar o número de faces para a divisão longitudinal e transversal.

O problema de normais invertidas (Figura 31) pode ocorrer no momento da importação do arquivo do modelo para outro *software*. Por isso, os *softwares* de impressoras tridimensionais detectam as normais invertidas e fornecem o comando para ajustar as normais, ou ainda podem executar a tarefa automaticamente no momento da importação do arquivo.

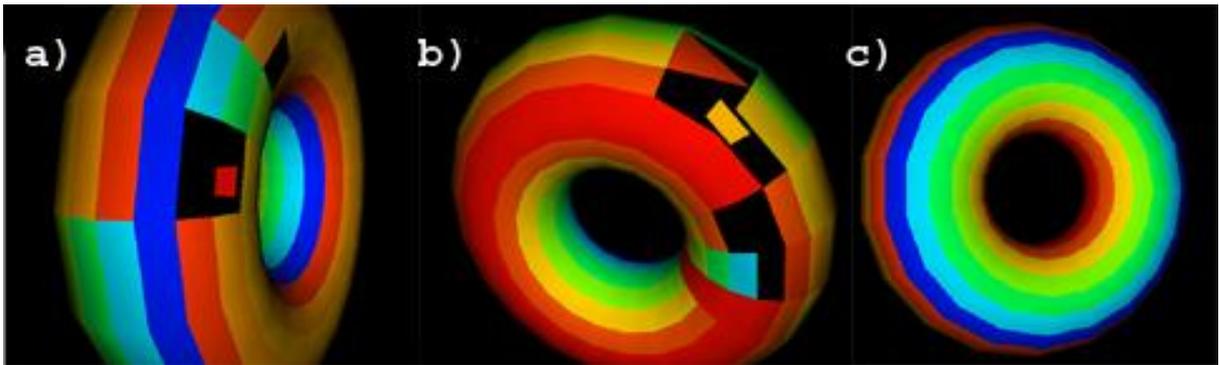


Figura 31 - Exemplos de: a) Orientação inconsistente da normal; b) Objeto com normais trocadas; c) Objeto com normais apresentadas corretamente
 Fonte: Veleba; Felkel, 2007, p. 5

A opção de unir os elementos que pertencem à mesma geometria, por meio de comandos dentro do ambiente de modelagem, pode evitar os problemas representados nas Figuras 31 e 32:

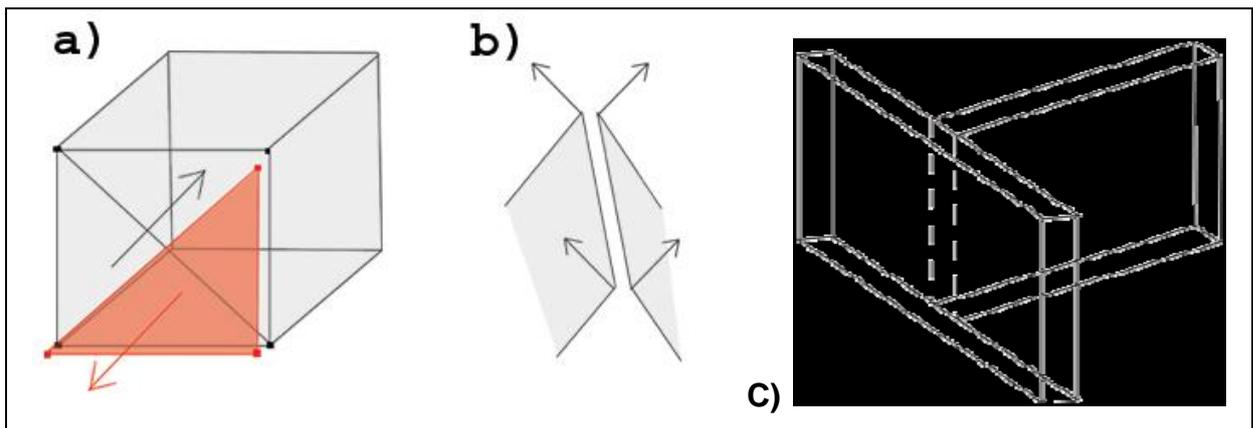


Figura 32 - Exemplos de geometria duplicada: a) Cubo com um lado triangulado e desviado; b) Vértices e arestas duplas ao longo da borda; c) polígonos invisíveis na junção das duas paredes
 Fonte: Veleba; Felkel, 2007, p. 4-6

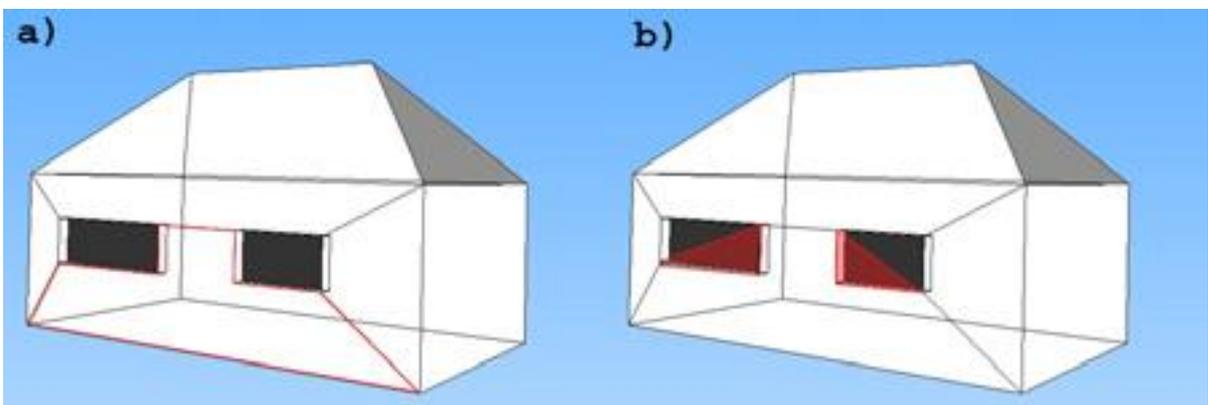


Figura 33 - Exemplo de Erros de Cavidade. a) Superfície original (traçado vermelho)
 Fonte: Veleba; Felkel, 2007, p. 7

Além dos procedimentos preventivos, descritos acima, a serem efetuados durante a construção da geometria do modelo, o usuário também tem outra opção. McKenney (1998, p. 10) sugere implementar um programa de qualidade contendo os seguintes itens: melhoria da técnica de modelagem, relatório de *bugs* de *softwares* e requisitos de usuários para melhor investigação neste campo. Estes procedimentos podem resultar na redução em até 80% nos problemas ocorridos durante o processo de prototipagem rápida.

No sentido de automatizar o trabalho de controle de qualidade, um *software* pode efetuar a tarefa de analisar o modelo CAD, antes de exportá-lo para o *software* de impressão tridimensional. Uma vez identificado o problema, este pode ser ajustado, na etapa inicial de desenvolvimento, ocasião em que as alterações podem ser incorporadas de forma rápida e com menos custos, e com o pleno conhecimento da intenção do projetista.

Um dos *softwares* disponível no mercado, utilizado com esta função e conhecido na área de engenharia, é o CADIQ da ITI. O *software* diagnostica os problemas de projeto e os registra no formato de relatório padrão PDF 3D, para que os profissionais da engenharia possam retornar ao modelo do projeto e corrigi-los (ITI, 2012). Alguns sistemas CAD genéricos também oferecem este recurso, como por exemplo, o *software* FormZ com a ferramenta *Doctor Object Tools*.

Os fornecedores de equipamentos para prototipagem disponibilizam *softwares* para importar o arquivo de modelo CAD, que utilizam um ou variados tipos de padrão de extensão de arquivo como STL, VRML, PLY, 3DS, ZPR ou OBJ. Estes *softwares* oferecem comandos de edição simples, como a inversão de normais. Dependendo do caso, os sistemas de prototipagem podem oferecer *softwares* para verificar e editar a geometria do modelo, como por exemplo, o *software* ZEdit Pro da ZCorporation.

Sendo assim, o *software* de cada fornecedor de impressora tridimensional, juntamente com os procedimentos preventivos descritos anteriormente, são os recursos adotados para o controle de qualidade do modelo CAD, para efeito do experimento realizado nesse trabalho de pesquisa.

7 MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO

A hipótese deste trabalho é de que o uso de diferentes tipos de sistemas CAD e de prototipagem rápida resulta em diferentes níveis de sucesso na transferência de informações entre os mesmos, devido ao grau de precisão de cada sistema. Apesar do variado grau de precisão, estes sistemas produzem modelos físicos digitais com a representação satisfatória em relação ao modelo virtual original, portanto sem necessidade de retrabalho.

A verificação da hipótese acima apresentada será feita por meio de experimentos com modelos virtuais, elaborados em três diferentes tipos de sistemas CAD, para serem exportados e reproduzidos em dois diferentes tipos de sistemas de prototipagem rápida, conforme demonstra o quadro abaixo:

Quadro 7 - Fases do método de investigação

FASE	FERRAMENTA DIGITAL	ARQUITETO	RESULTADO
Fase 1 (Modelagem no sistema CAD)	Sistema CAD Específico: Revit Architecture 2012 Sistemas CAD Genéricos: AutoCAD 2012 FormZ 6.7.3	<ul style="list-style-type: none"> Definir Projeto 	<ul style="list-style-type: none"> Projeto Conceitual: Etapa Inicial
	Especificações dos Equipamentos: Impressora 3DP ZCorp (Z) e Impressora FDM MakerBot (X) <ul style="list-style-type: none"> Espessura mínima = 2 mm / 1 mm Definição Escala = 1:100 / 1:200 Tamanho Máximo do modelo = 203x203x254 mm / 100x100x150 mm Formato: STL 	<ul style="list-style-type: none"> Verificar a qualidade do Modelo: União ou Fechamento das geometrias Ajustes do Modelo: Quadrante (+) x, y, z Modelar CAD A Revit (rvt) Modelar CAD B AutoCAD (dwg) Modelar CAD C FormZ (fmz) 	<ul style="list-style-type: none"> Modelo CAD A Revit (rvt) Desenhos com Cotas: Plantas Baixas / Cortes / Fachadas Modelos CAD A/ B/ C Vistas Axonométricas em (jpg) Modelos CAD A/ B/ C Exportar em (STL)
Fase 2 (Planejamento)	<i>Software</i> Impressora 3DP: ZPrint 7.10 (zbd) <i>Software</i> Impressora FDM: ReplicatorG 29 (gcode)	Modelos CAD A/ B/ C <ul style="list-style-type: none"> Importar em (STL) Verificar a Interoperabilidade entre os sistemas Configurações: Normais, escala, rotação, suporte, ponto de origem Arquivos imp 3D (zbd) e (gcode) 	<ul style="list-style-type: none"> Salvar Modelos CAD importados em (zbd) e (gcode): Modelo CAD AZ (zbd) Modelo CAD BZ (zbd) Modelo CAD CZ (zbd) Modelo CAD AX (gcode) Modelo CAD BX (gcode) Modelo CAD CX (gcode) Salvar vistas em (prtscn)
Fase 3 (Fabricação no sistema de prototipagem rápida)	Impressora 3DP ZCorp (Z) Impressora FDM MakerBot (X)	<ul style="list-style-type: none"> Abrir arquivos impressoras 3D Observar o tempo de fabricação Observar a quantidade de material utilizado Ajustar impressoras 3D 	<ul style="list-style-type: none"> Fabricação Protótipo Rápido: Protótipo Rápido (AZ) Protótipo Rápido (BZ) Protótipo Rápido (CZ) Protótipo Rápido (AX) Protótipo Rápido (BX) Protótipo Rápido (CX)
Fase 4 (Acabamento)	Máquina Fotográfica Sony nex7	<ul style="list-style-type: none"> Limpeza Lixamento ou Resinagem 	<ul style="list-style-type: none"> Fotos dos Protótipos Rápidos: Imagens PR (AZ) Imagens PR (BZ) Imagens PR (CZ) Imagens PR (AX) Imagens PR (BX) Imagens PR (CX)

Fonte: Autoria nossa

O método de investigação deste experimento adotou como base as fases gerais do processo de prototipagem rápida, por técnica de adição, a saber: CAD, Planejamento, Fabricação e Acabamento, conforme citado no capítulo 5 deste trabalho (Volpato et al., 2007 apud Pupo e Celani, 2011, p. 473).

Os resultados obtidos em cada fase serão utilizados para verificar a hipótese em duas etapas distintas. A primeira etapa consiste em verificar se todos os elementos geométricos são exportados do sistema CAD para serem importados para o sistema de prototipagem rápida. A segunda etapa consiste em verificar se todos os elementos, importados pelo sistema de prototipagem rápida, produzem os modelos físicos digitais com a mesma representação geométrica formal do modelo CAD original.

Na primeira etapa, cada arquivo dos três tipos de sistemas CAD é exportado no formato STL, para depois ser importado por cada um dos dois tipos de *softwares* de sistema de prototipagem rápida utilizados neste experimento. Nesse momento, é possível observar visualmente se todas as geometrias que compõem o modelo são importadas, integralmente, para dentro do ambiente gráfico do *software* do sistema de prototipagem.

De maneira a registrar esse tipo de avaliação, as imagens dos resultados obtidos na Fase 1 são comparadas às imagens dos resultados obtidos na Fase 2, as quais consistem de vistas externas do modelo. As informações com as quantidades e os tipos de elementos geométricos que compõem o modelo são especificadas e associadas às imagens, como por exemplo: (01) um piso, (02) duas paredes, entre outros.

A interoperabilidade, ou seja, a capacidade de transferência de dados entre os sistemas será avaliada em sentido único, que segue do sistema CAD para o sistema de prototipagem rápida, e não ao contrário. Quando houver necessidade de retrabalho na reconstrução da geometria do modelo, esta será feita no arquivo original do sistema CAD, para novamente ser exportado e depois importado no sistema de prototipagem.

Na segunda etapa, os resultados obtidos na Fase 4 (acabamento) da experimentação permitem verificar a representação formal geométrica, em termos de precisão, em relação ao dimensionamento e à resolução da forma, comparados aos modelos CAD originais.

As medidas gerais são conferidas com base na largura, profundidade e altura (L x P x H) de cada elemento arquitetônico externo identificado, como por exemplo: parede externa, pilar externo, entre outros. As dimensões serão obtidas do modelo CAD, a partir de comandos específicos de cada *software*, conforme projeto no Apêndice A. Essas medidas serão registradas com as medidas obtidas diretamente do protótipo rápido, por meio do uso de escalímetro.

Além das medidas gerais, o modelo é avaliado visualmente pelo aspecto formal, de maneira que a representação dos elementos geométricos ortogonais deve ser linear, constante e uniforme para aferir precisão. No caso das geometrias curvas e superfícies complexas, o grau de resolução é observado pela representação em maior ou menor número de faces em elementos planos, que por sua vez podem variar em seu tamanho.

Uma curva com maior resolução geralmente representa, de forma menos perceptível, a divisão das faces da geometria. A superfície curva é dividida em maiores quantidades de faces, em tamanhos menores, gerando formatos de arquivos maiores. Assim, os tamanhos em *bytes* dos arquivos dos modelos CAD e os arquivos formato STL também serão comparados.

As imagens dos resultados obtidos nas Fases 1, 2 e 4 serão registradas para efeito de comparação e avaliação, assim como as quantidades. Ainda, os tipos e as dimensões dos elementos geométricos que compõem cada modelo serão igualmente listados.

As informações específicas são implementadas para o desenvolvimento de cada uma das fases: Fase 1 (modelagem no sistema CAD), Fase 2 (Planejamento), Fase 3 (Fabricação no sistema de prototipagem rápida) e Fase 4 (Acabamento), baseadas no material teórico desta pesquisa, e detalhadas no item Descrição do Método de Investigação. A seguir serão identificados os sistemas CAD e os sistemas de prototipagem rápida que serão utilizados no experimento.

7.1 Equipamentos e *softwares* de sistemas CAD

Para obtenção do modelo CAD, de maneira suficientemente abrangente, foram utilizados três tipos diferentes de *software* de sistemas CAD, que oferecem ferramentas apropriadas para modelagem e documentação, desde a etapa inicial de

projeto. Os dois *softwares* de sistema CAD genérico utilizados serão o AutoCAD 2012 (Autodesk) e o FormZ 6.7.3 (AutoDesSys), e um *software* de sistema CAD específico (BIM) será é o Revit Architecture 2012 (Autodesk), os quais são descritos a seguir:

a) o *software* AutoCAD 2012 da empresa Autodesk é utilizado por arquitetos, engenheiros e projetistas para elaborar e documentar os projetos. O sistema oferece ferramentas bidimensionais e tridimensionais como modelagem de superfícies, malhas e sólidos, ferramentas de documentação de modelos, recursos de desenho paramétrico, entre outras. O seu arquivo nativo é o formato DWG (AUTODESK, 2012a).

Pesquisas publicadas em 2009 concluem a opção do AutoCAD como o *software* com o maior índice de apropriação, quanto ao uso entre os arquitetos. Em resultado de pesquisa nacional, realizada em 2009 nos escritórios paulistanos, o AutoCAD impõe-se com a maioria das indicações (52,94%), na etapa inicial de concepção do produto, enquanto que o *software* Revit Architecture, mesmo com porcentagem de apenas 11,76%, é o sistema BIM mais utilizado entre os profissionais de arquitetura. (NARDELLI; VICENT, 2009).

b) o FormZ 6.7.3 da empresa AutoDesSys é um *software* de modelagem tridimensional que combina superfícies e sólidos, com extenso conjunto de formas bidimensionais e tridimensionais. Oferece recursos de animação e módulo para renderização, com efeito de iluminação baseada em radiosidade. O sistema responde às necessidades das fases iniciais de concepção de projeto, até as fases finais de modelos tridimensionais com detalhes complexos. Por ser um modelador de uso geral, é utilizado em diferentes áreas de projeto e o seu arquivo nativo é o formato FMZ (AUTODESSYS, 2012).

c) o Revit Architecture 2012 é um sistema da Autodesk que utiliza a tecnologia BIM. As informações são armazenadas em um banco de dados central, associadas ao modelo tridimensional, e a documentação bidimensional é consequência da modelagem. Oferece recursos especializados como a parametrização para o projeto conceitual, análise, processamento e documentação arquitetônica (AUTODESK, 2012b; JUSTI, 2010).

No caso dos sistemas BIM, pesquisa realizada pela *McGraw-Hill Construction* em 2008 revela que o *software* Revit Architecture também é o mais utilizado pelos profissionais norte-americanos da Arquitetura, Engenharia e

Construção, com porcentagem maior (67%) que a do mercado brasileiro. Os argumentos mencionados para a escolha desse sistema BIM são a maior disponibilidade para formação de profissionais e menores custos em relação aos outros sistemas (CEFRIIO, 2011, p. 34).

O equipamento utilizado nesta pesquisa, para trabalhar com os *softwares* de sistemas CAD, é assim descrito: notebook Sony Vaio, processador Intel (R) Core (TM) i7, Q720, 1.60 GHz, memória RAM 6GB DDR3, monitor flat panel LCD (1920x1080 60 Hz) Full HD, placa de vídeo NVIDIA GeForce GT 330M e sistema operacional Windows 7 Home Premium 64 bits.

7.2 Equipamentos e *softwares* de sistemas de prototipagem rápida

Nesta pesquisa, um dos sistemas definidos para prototipagem rápida foi a tridimensional ZPrinter 310 plus, existente no Laboratório de Fabricação Digital e Customização em Massa (LFDC), da Pós-graduação do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Esta impressora, fabricada pela ZCorporation, utiliza o método de adição de camadas, com material em pó "zp 150" e aglutinante "zb60 clear". Para o pós-processamento, o material comumente utilizado é a resina "Z-Bond 101".

Como visto anteriormente no capítulo 5, esse equipamento também é apropriado para prototipagem de modelos CAD na etapa inicial de projeto, e permite a produção de modelo prototipado a nível experimental, atendendo aos requisitos necessários para a elaboração do experimento deste trabalho.

Este mesmo equipamento pode ser encontrado em importantes laboratórios, nacionais e estrangeiros, que trabalham com as questões vinculadas à tecnologia de fabricação digital aplicada à arquitetura, como o Laboratório de Prototipagem e Automação para Arquitetura e Construção (LAPAC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), no Brasil, e no exterior o laboratório de prototipagem digital da escola *Architecture Association* (AA) na Inglaterra.

No portal do LAPAC (<http://www.fec.unicamp.br/~lapac/>) - opção de equipamentos, o usuário pode obter, entre outras informações, um roteiro de como utilizar essa impressora tridimensional. O *site* do Laboratório da AA *School of Architecture* (<http://www.digitalfabrication.net/>) também oferece informações sobre o

procedimento adequado para impressão tridimensional do modelo digital, para a mesma impressora.

A impressora ZPrinter 310 possui o *software* ZPrint, fornecido com o equipamento para viabilizar a impressão. O *software* ZPrint oferece recursos para o usuário preparar o arquivo CAD para a impressão no sistema tridimensional ZPrinter. Dentre os principais recursos oferecidos, destacam-se a possibilidade de importação e de exportação de arquivos STL, melhores funções de visualização e comandos de edição com escalonamento e rotação do objeto (ZCORP, 2011).

A impressora tridimensional da ZCorporation apresenta as seguintes características, listadas no quadro abaixo:

Quadro 8 - Especificações técnicas da impressora ZPrinter 310 plus monocromática

MODELO ZPRINTER 310 PLUS MONOCROMÁTICA	
Resolução:	300 x 450 dpi
Velocidade de Construção na vertical:	25 mm/ hour
Tamanho Construção:	203 x 254 x 203 mm
Opções de Material:	Composto de Alto Desempenho, Fundição Direta, Elastomérico
Espessura da Camada:	0,089 a 0,203 mm
Número de Jato:	304
Formatos de Arquivos para Impressão:	STL, VRML, PLY, 3DS, ZPR
Dimensões do Equipamento:	74 x 86 x 109 cm
Peso do Equipamento:	115 kg
Requisitos de Energia:	90-110V, 5.3A; 100-120V, 4.3A; 200-240V, 2.4A
Sistemas Operacionais compatíveis:	Windows®
Conformidade e Regulamentação:	CE, CSA
Preço:	U\$ 32.000,00 + impostos (junho 2012 = ZPrinter 150)
Softwares:	ZPrint e ZEdit Pro

Fonte: ZCorp, 2011

A outra opção de equipamento para execução do modelo digital, conhecida como impressora tridimensional *desktop*, utiliza o método de adição de camadas de material sólido - plástico ABS e PLA, pelo processo de modelagem por deposição e fusão (FDM). O baixo custo do equipamento e do material, em relação às impressoras de alta resolução, atende a um mercado de escritórios médios, pequenos e *Home Office*, que até pouco tempo, por limitação financeira, consideravam apenas a terceirização de serviços de prototipagem rápida. Essas impressoras possuem, ainda, a condição de serem autocopiadoras, ou seja, podem reproduzir as peças para montagem de outras impressoras iguais à original.

Dentre outras opções no mercado, pode ser citada a RepRap 1.0 "Darwin", que é uma impressora tridimensional *desktop* livre, Licença Pública Geral GNU,

autocopiadora (REPRAP, 2012). Há também a impressora RapMan 3.1 Universal (TURBOCAD, 2012) e a impressora Thing-O-Matic (MAKERBOT, 2012) - além das mesmas características de funcionamento e material, possuem custos similares aos da RepRap 1.0 "Darwin".

Mesmo apresentando desvantagens de baixa resolução e tamanho pequeno para impressão, a impressora tridimensional *desktop* é indicada para protótipos experimentais, na etapa inicial de projeto, de forma que atende aos requisitos estabelecidos para a elaboração do experimento desse trabalho, como a escala reduzida, o menor tempo de fabricação, o menor custo e menor precisão.

A segunda impressora utilizada no experimento, nesta Dissertação, foi a impressora tridimensional *desktop* da empresa MakerBot, que apresenta as seguintes características:

Quadro 9 - Especificações técnicas da impressora Thing-O-Matic

MODELO THING-O-MATIC	
Resolução:	2,5 microns no eixo Z e 11 microns nos eixos X, Y
Velocidade de Construção na vertical:	40 mm/ min
Tamanho Construção:	100 x 100 x 150 mm
Opções de Material:	Plástico ABS e PLA (Bio material a base de milho)
Diâmetro do Material:	1,75 mm
Espessura da Camada:	2 a 3 mm
Taxa de Fluxo:	24 cc/ h
Formatos de Arquivos para Impressão:	STL, GCode, OBJ
Dimensões do Equipamento:	320 x 467 x 381 mm
Peso do Equipamento:	14,51 kg
Requisitos de Energia:	100-240V, 50/60 Hz, 4.0 A
Sistemas Operacionais compatíveis:	Linux, Windows® e OSX
Preço:	US\$ 1,299,00 (março 2011)
Softwares:	ReplicatorG

Fonte: Makerbot, 2012

7.3 Descrição do método de investigação

Para verificar a capacidade de interoperabilidade entre os sistemas CAD e os de prototipagem rápida, no início do processo de projeção arquitetônica, e avaliar a fidedignidade do aspecto formal do modelo físico produzido a partir do modelo CAD original, serão realizados seis tipos de experimentos, desenvolvidos em quatro fases descritas a seguir:

7.3.1 Fase 1 (Modelagem no sistema CAD)

Na Fase 1 (modelagem no sistema CAD) o projeto arquitetônico será definido utilizando o sistema CAD específico (BIM) - o *software* REVIT 2012 (Autodesk), de maneira que se possa obter o primeiro modelo CAD, nomeado como modelo CAD (A). O projeto arquitetônico a ser tratado é de uma edificação de pequeno porte, com área máxima de 250 m², na etapa inicial de concepção de projeto, momento de definição do conceito formal da edificação. O partido do projeto deverá apresentar uma volumetria compondo formas retilíneas mais simples e formas curvas livres mais complexas, de maneira a justificar o uso do sistema de prototipagem rápida, e ao mesmo tempo apresentar fácil entendimento para a reprodução desse projeto em diferentes sistemas CAD. O programa de necessidades foi definido para elaborar um projeto de escritório de arquitetura, para 5 (cinco) pessoas, contendo um banheiro, uma copa e uma sala de reunião.



Figura 34 - Local do terreno do experimento (@-15.841028,-47.897456)

Fonte: Google, 2012

O terreno existente e utilizado neste projeto possui área total estimada de 820,00 m², em formato trapezoidal com largura mínima de 18 metros e 42 metros de comprimento mínimo perpendicular ao lago. Fica localizado na cabeceira sudeste da ponte Presidente Médici, no Lago Sul na cidade de Brasília-DF, conforme área delimitada em hachura azul, na imagem da Figura 34.

O enfoque deste experimento é avaliar informações do modelo na etapa inicial do projeto, para uma melhor delimitação do grau de detalhamento a ser considerado na modelagem. Foram considerados os aspectos formais de maquetes preliminares, etapa anterior às definições formais da maquete de desenvolvimento e de apresentação.

As maquetes preliminares constituem a fase inicial das maquetes de estudo de projeto. De uma maneira geral, não são elaboradas com a preocupação de precisão e são produzidas em escalas relativamente reduzidas, abaixo de 1:500 no caso de edificações pequenas (inferiores a 500 m²) e, para edificações acima desta metragem, a escala pode variar para maior que 1:500. A preocupação é oferecer um recurso para visualização do espaço e da volumetria. Podem ser utilizadas para explorar alinhamentos, proporções e definições espaciais (MILLS, 2007, p. 22-26).

No caso das maquetes de desenvolvimento, as decisões iniciais já foram tomadas, e outros tipos de análises e definições de detalhes de esquadrias, revestimentos, estrutura e cobertura devem ser considerados, enquanto que as maquetes de apresentação representam um projeto finalizado. Essas etapas não estão sendo consideradas para a elaboração deste experimento, pois são mencionadas no item - Desdobramentos Futuros, desta pesquisa.

No sentido de efetuar o controle de qualidade do modelo CAD, o fechamento dos objetos deverá ser verificado por meio de comandos para unir as partes de um mesmo elemento. Na execução da modelagem dos elementos geométricos complexos, com dupla curvatura, será adotada a resolução padrão (*default*) do sistema CAD utilizado.

A modelagem dos elementos do projeto deve seguir os limites especificados pelos fabricantes dos equipamentos, com especial importância para aqueles que definem espessuras mínimas. A escala poderá ser de 1:200 a 1:100, o que na etapa inicial oferece informações adequadas para a avaliação formal do projeto.

O modelo deverá ser pensado como elemento inteiro, produzido de uma única vez, sem a necessidade de montagem de partes separadas. Por isto deverá

obedecer ao limite do tamanho da área disponível para a construção, e sua unidade adotada será o metro.

O modelo não deverá ser pensado como um elemento todo maciço. No sentido de produzir um protótipo com aspecto o mais próximo ao produto final construído, o arquiteto deverá modelar a parte interna do projeto, contendo os elementos estruturais e de vedação, como por exemplo: paredes, coberturas, pilares, vigas e lajes.

Os elementos que representam a transparência, como no caso dos vidros, não deverão ser modelados. Da mesma forma, os equipamentos utilizados para efeito de humanização, como mobiliário, vegetação, pessoas e terreno não deverão ser considerados no modelo para prototipagem.

No caso da impressora Zprinter, que utiliza material em pó, há necessidade de se considerar uma abertura no invólucro para retirada do material interno. Conforme a definição do projeto, a ausência da representação dos vidros também poderá resolver essa questão.

O modelo inteiro deverá estar localizado preferencialmente no quadrante positivo, coordenadas absolutas (X,Y,Z), de maneira a reduzir possíveis erros existentes no momento de tradução das normais, da geometria do modelo CAD para o formato STL.

No sentido de melhorar as condições visuais de comparação entre o modelo virtual e o modelo prototipado, serão definidos os mesmos aspectos de acabamento: o material especificado para o modelo CAD deverá ser na cor branca opaca, e o fundo da imagem deverá ser na cor preta RGB (0,0,0).

Após o término da definição da volumetria do projeto - no caso o modelo CAD A, construído no sistema CAD específico Revit (Autodesk) - será possível extrair os desenhos de plantas, cortes e fachadas com as respectivas medidas, para que se possa construir o mesmo projeto com a geometria original nos sistemas CAD genérico AutoCAD (Autodesk) e FormZ (AutoDesSys).

A partir do modelo CAD A (Revit), também serão obtidas as imagens de diferentes pontos de vista, de cada vértice de duas fachadas, quatro perspectivas externas, uma com orientação nordeste, uma noroeste, uma sudeste e uma sudoeste. As imagens serão comparadas com as fotos das vistas equivalentes aos modelos prototipados digitalmente.

Por último, nesta Fase 1 (modelagem no sistema CAD), o arquivo do modelo CAD A (Revit) será exportado no formato STL padrão *default* binário. Importante ressaltar que, uma vez que a versão 2012 do Revit Architecture não possui originalmente o comando STLEXPORt dentro do seu ambiente gráfico, é necessário que o usuário importe este comando na opção Add-Ins>External Tools. Entretanto, antes da importação deve-se baixar o Plug in STLEXPORt do Revit 2012, que pode ser acessado livremente pelo site <<http://sourceforge.net/projects/stlexporter/files/2012/>>.

No sistema CAD genérico, utilizando o *software* AutoCAD 2012 (Autodesk) e o *software* FormZ 6.7.3, serão construídos os modelos CAD B (AutoCAD) e CAD C (FormZ), um de cada vez, baseados nas informações do projeto, plantas, cortes e elevações dimensionadas, conforme definido anteriormente.

A fim de garantir o controle de qualidade e a equidade entre os modelos, serão considerados os mesmos procedimentos anteriormente definidos para o modelo CAD A, com os respectivos ajustes para obtenção dos modelos CAD B (AutoCAD) e CAD C (FormZ). O mesmo material, com as mesmas vistas e imagens, deverá ser obtido para efeito de comparação entre os modelos CAD A (Revit), CAD B (AutoCAD) e CAD C (FormZ). Ainda, cada modelo será comparado com os seus respectivos protótipos.

O término da Fase 1 (modelagem no sistema CAD) ocorrerá no momento em que os três arquivos de formato STL forem gerados, a partir de cada um dos arquivos de sistema CAD.

7.3.2 Fase 2 (Planejamento)

Na Fase 2 (planejamento) os arquivos STL gerados serão importados e avaliados um a um, pelo *software* de cada impressora tridimensional. Cada arquivo STL seguirá o mesmo procedimento após sua importação.

Após importar o arquivo STL, no *software* da impressora tridimensional, a geometria de cada modelo de arquivo deverá ser representada integralmente dentro do ambiente gráfico do *software* da impressora tridimensional.

A interoperabilidade entre os sistemas será registrada numa primeira etapa, por meio de uma imagem do modelo importado, em pontos de vista equivalentes

àqueles obtidos no modelo CAD, utilizando a tecla *print screen*, PrtSc do teclado. Será observado se todos os elementos geométricos do modelo CAD estão sendo representados na imagem do ambiente gráfico, do *software* do equipamento de impressão tridimensional.

Caso ocorram falhas na visualização do modelo, como a inversão das normais das faces da geometria, o único procedimento permitido será o uso de comando para inversão das normais, fornecido pelo *software* da impressora tridimensional, para não comprometer a geometria do modelo. Alguns *softwares* disponibilizam a opção de correção automática (ou manual), no momento da importação do arquivo.

No caso de haver outros problemas de representação geométrica do modelo, o problema deverá ser registrado e a correção deverá ser efetuada no respectivo *software* de sistema CAD, de maneira a refazer todo o processo descrito na Fase 1 (modelagem no sistema CAD).

Após a confirmação de que a geometria do modelo foi importada corretamente, ou seja, a interoperabilidade tenha ocorrido integralmente, os itens para impressão deverão ser configurados. Os itens a serem configurados deverão encontrar-se na mesma escala do modelo, observando-se o seu ponto de origem em relação à base de impressão, a necessidade de rotação, orientação e suporte, para que o modelo possa ser fabricado sem danos, durante a sobreposição de camadas, e no momento da retirada do mesmo da base de impressão.

Por último, na Fase 2 (planejamento), o arquivo importado e avaliado será salvo no formato padrão do equipamento de impressão tridimensional. Serão gerados seis arquivos no total, sendo três a partir da impressora Zprinter, os quais são ZBD (AZ), (BZ) e (CZ), e outros três arquivos a partir da impressora Thing-O-Matic, sob a denominação GCode (AX), (BX) e (CX).

7.3.3 Fase 3 (Fabricação no sistema de prototipagem rápida)

Na Fase 3 (fabricação), os arquivos no formato padrão de cada impressora tridimensional serão abertos, um de cada vez, no *software* do respectivo equipamento, e será acionado o comando para verificar o tempo gasto estimado e a quantidade de material necessário para produzir cada protótipo.

No sentido de fabricar os modelos, o usuário deverá seguir as instruções conforme manual do equipamento do fabricante. Deverá ser produzido um total de seis protótipos rápidos: (AZ), (BZ) e (CZ) da impressora da ZCorporation, e (AX), (BX) e (CX) da impressora da MakerBot.

7.3.4 Fase 4 (Acabamento)

Na Fase 4 (acabamento) serão executados os acabamentos de limpeza e de resinagem nos protótipos rápidos (AZ), (BZ) e (CZ), fabricados pela impressora da ZCorporation. Os protótipos rápidos (AX), (BX) e (CX), fabricados pela impressora Thing-O-Matic, serão lixados no caso de existência de excesso de material. Os protótipos rápidos acabados serão fotografados, considerando-se os mesmos pontos de vista definidos anteriormente nas imagens dos modelos CAD (A), (B) e (C).

As imagens dos modelos CAD serão comparadas com as imagens das fotos, com as vistas equivalentes às dos protótipos rápidos. Desta maneira, será possível verificar a segunda etapa sobre a interoperabilidade entre os sistemas, como a similaridade da aparência geométrica, assim como a precisão das medidas dos elementos entre o modelo CAD e o respectivo protótipo rápido.

8 EXPERIMENTAÇÃO

8.1 Fase 1 (Modelagem no sistema CAD)

O projeto foi definido a partir do programa de necessidades e da localização do terreno, conforme apresentados anteriormente no item 7.3.1. A ideia do projeto foi concebida diretamente dentro do ambiente gráfico do *software* CAD específico Revit Architecture 2012. Este *software* foi escolhido para conceber o projeto por oferecer mais opções de recursos automatizados para representação dos desenhos bidimensionais, necessários para reproduzir os outros dois modelos CAD.

A imagem em formato padrão JPG do terreno foi obtida no *site Google Maps* e importada para dentro do *software*, opção *Floor Plans>Site*. As curvas de níveis foram construídas com o comando *Massing & Site>Toposurface*, em declive na direção do lago.

O partido do projeto do escritório de arquitetura teve como base um quadrado de 10x10 m, comando *Home>Model Line>Rectangle*, e um mezanino ocupando metade do pavimento superior, encostado na fachada sul, comando *Home>Line*. A entrada principal ficou localizada na fachada norte, que recebeu chanfros de 45 graus nas duas laterais, com a intenção de aumentar a visibilidade interna para a ponte e para o lado leste do Lago de Brasília. A fachada oeste recebeu paredes sem aberturas e acomodou o banheiro e a copa. A fachada leste, também sem aberturas, sustenta a escada do térreo ao mezanino.

A proposta de volumetria foi trabalhar o piso e a cobertura como elementos contínuos, de maneira a oferecer um espaço mais reservado na fachada sul, definindo um ambiente de jardim interno. Ainda, estabelecemos uma proteção maior nas fachadas nordeste e noroeste, com o prolongamento da cobertura em balanço. A cobertura e piso avançam nas fachadas laterais oeste e leste, protegendo as paredes e possibilitando circulação de pedestre a partir do nível mais alto do terreno.

A definição das espessuras de paredes, vigas, pilares e laje foi baseada nos cálculos de espessura mínima na escala 1:100 - na impressora 3D Zprinter igual a 2 mm, ou seja, para dimensão mínima no projeto igual a 20 cm. No caso da impressora 3D Thing-O-Matic, a escala mínima para efeito de cálculo foi de 1:200,

com espessura limite igual a 1 mm, o que equivale à mesma espessura mínima de 20 cm, igual à impressora anterior.

Os mobiliários da biblioteca *default* do *software* Revit foram utilizados para auxiliar na definição dos espaços internos. Na entrada do escritório, o espaço para espera e recepção encontra-se localizado em área com pé-direito duplo. O espaço sob o mezanino abriga as estações de trabalho para quatro postos, bem como o banheiro e a copa (na lateral oeste do espaço). A porção superior do mezanino foi destinada à sala de reunião, comportando uma mesa para oito pessoas. A área total estimada, referente ao atelier de projeto, é de 222 m², sendo área do térreo 172 m² e mezanino 50 m².

Nesta primeira etapa de concepção de projeto foi definida a volumetria geral da forma do projeto, sem detalhes específicos como as esquadrias das portas e janelas. O modelo com a definição do projeto foi salvo com o nome "modelo CAD A - Definição", no formato rvt, para servir de base para o arquivo do Modelo CAD A, modelado no *software* Revit Architecture 2012.

8.1.1 Modelo CAD A (Revit)

A partir do modelo CAD A - Definição.rvt - foi obtido o arquivo modelo CAD A (Revit), contendo apenas os elementos geométricos necessários para serem fabricados na prototipagem. Os equipamentos utilizados para efeito de humanização, como por exemplo mobiliário, vegetação, pessoas e terreno foram excluídos do arquivo Modelo CAD A (Revit), por meio do comando *>Delete*.

O projeto foi modelado a partir de algumas configurações dentro do ambiente gráfico do *software*, como a unidade de desenho no comando: *Manage>Project Units>Length>Units>Meters*.

As alturas de pé-direito foram definidas em: *Elevation (Building Elevation)>North* com valor igual a (2.7).

A partir do Level 2 com o comando: *Modify / Levels>Copy*, foi criado o nível para construção do mezanino, com valor de pé-direito igual a (2.7).

As paredes e os pilares foram definidos no comando:

Home>Wall>Basic Wall Generic - 200mm

Edit Type>Duplicate>Name>Wall>material 1

Material>Wall>material 1
Appearance>Color>RGB 255 255 255
Image Fade>100
Glossiness>50
Highlights>Non-Metalic
Self Illumination selecionada.

As vigas foram definidas no comando:

Structure>Beam>M_Concrete-Retangular
Beam>Dimensions>b 0,20 e h 0,40
Beam Material>Wall>material 1.

Todos os elementos geométricos tiveram o material selecionado em:

Wall>material 1.

A base do modelo foi construída com o comando:

Home>Floor>Structure>Thichness>0.80.

A laje do mezanino foi definida com o mesmo comando e espessura diferente: *Home>Floor>Structure>Thichness>0.30.*

Na construção da escada foi utilizado o comando:

Home>Stair>Run
Monolithic Stairs
Minimum Tread Depth>0,28
Tread Thickness>0,05
Maximum Riser Hight>0,175
Riser Thickness 0,0125

as demais especificações com o valor *Default*.

O volume do invólucro, sem a parte da frente da cobertura em balanço, foi construído com o comando:

Home>Component>Model In place>Generic Models
Void Extrusion

A parte do volume em curva da cobertura em balanço foi construída posteriormente com o comando:

Massing & Site>In-Place Mass.

O elemento em dupla curvatura em balanço não pode ser transformado pelo comando de edição *Massing & Site>Roof*, para receber as características de telhado.

A geometria ficou definida como elemento geométrico genérico. O comando não permitiu a pré-definição nem a edição para o aumento de resolução da superfície, e também não permitiu que esse elemento fosse unido com o restante do elemento que forma a cobertura e piso, pelo uso do comando:

Modify>Join

Foram definidas quatro vistas diferentes, duas perspectivas isométricas externas com orientação sudoeste e sudeste, e duas axonométricas com orientação nordeste e noroeste, com ponto de vista na altura do observador. No sentido de melhor visualizar a parte interna do modelo, com o auxílio do botão central do mouse associado à tecla *shift*, foi utilizado o comando:

View>3D View

Após a visualização de cada uma das vistas o comando:

View>Render

Quality>Settings>Best

Lighting>Scheme>Exterior>Sun only

Background> Style>Color> Black

as demais opções em *default*.

Depois de processada a imagem foi exportada com os respectivos nomes, Sudoeste A, Sudeste A, Nordeste A e Noroeste A, em formato padrão JPG, com o comando:

Image>Export

A partir do modelo CAD A foi gerado o arquivo formato STL, com o nome Modelo CAD A.stl, utilizando a opção do comando:

Add-Ins>External Tools>STLExport>Binary>Save

8.1.2 Modelo CAD B (AutoCAD)

O modelo CAD B foi reproduzido no *software* AutoCAD 2012, conforme as especificações dos desenhos gerados no modelo CAD A, planta baixa térreo, planta baixa mezanino, planta de cobertura, corte AA, corte BB, elevação norte, elevação sul, elevação leste e elevação oeste (Apêndice A). O arquivo foi salvo com o nome Modelo CAD B, formato de arquivo padrão DWG, utilizando o comando:

File>Save

As configurações gerais no ambiente gráfico do *software* foram definidas para unidade de desenho:

Format>Units>Meters

Linewheight>default

Layer>0

Color>White

Linetype>Continuous

O modelo foi construído no quadrante positivo das coordenadas absolutas em X,Y,Z. O material especificado para todo o modelo foi nomeado como parede branca por meio dos comandos:

Render>Materials Browser>Appearance

Color>RGB 255 255 255

Image Fade>100

Glossiness>50

Highlights>Non-Metallic

Self Illumination selecionada

A construção da geometria do modelo CAD B (AutoCAD) envolveu basicamente a utilização dos comandos:

Pline

Pedit>Close (para fechamento dos elementos de superfícies planas)

Draw>Modeling>Extrude (para completar o volume de cada parte da representação da base, pilares, vigas, paredes, escada, laje do mezanino e do invólucro formado pelo piso e cobertura).

As aberturas na superfície do invólucro foram subtraídas com o comando:

Modify>Solid Editing>Subtract

A parte da cobertura em balanço com dupla curvatura foi obtida utilizando o comando:

Draw>Modeling>Loft (que uniu o perfil retangular da cobertura com o outro perfil definido com os comandos):

Arc (três pontos)

Pline

Pedit>Close

Depois da modelagem de todos os elementos, o comando:

Modify>Solid Editing>Union foi utilizado para unir as duas partes do invólucro da cobertura, formando um elemento único. O mesmo foi feito para unir as paredes, as vigas com os pilares, a laje do mezanino e os degraus da escada.

Na configuração para o tratamento de imagem:

View>Visual Styles>Realistic

View>Render Environment

Color>0,0,0 (preto)

View>Render>Advanced Render Settings

Presentation

Output size>1024 x 768

Apply materials>On

Force 2-sided>On

Shadow map>Off

De maneira a obter as imagens desejadas, duas perspectivas isométricas externas foram definidas com orientação sudoeste e sudeste, por meio da utilização do comando:

View>3D Views>SW Isometric

View>3D Views>SE Isometric

Foram criadas duas perspectivas axonométricas com orientação nordeste e noroeste, por meio do comando *View>3D Views*

Após a visualização de cada uma das vistas, com ponto de vista na altura do observador, foram obtidas as vistas com os respectivos nomes Sudoeste B, Sudeste B, Nordeste B e Noroeste B, em formato padrão JPG, com o comando:

View>Render>Render

File>Save

Quality>Best

A partir do modelo CAD B, para obter o arquivo Modelo CAD B.stl, foi acionado o comando:

File>Export

Files of type> Lithography (.stl)*

8.1.3 Modelo CAD C (FormZ)

O modelo CAD C, formato de arquivo padrão FMZ, foi reproduzido no *software* FormZ 6.7.3, conforme as especificações dos desenhos gerados no modelo CAD A (Apêndice A) utilizando o comando:

File>Save

As configurações gerais no ambiente gráfico do *software* foram definidas para unidade de desenho:

Options>Working Units>Meters

O modelo foi construído no quadrante positivo das coordenadas absolutas em X,Y,Z. O material especificado para todo o modelo foi criado em:

Surface Styles>Parede Branca

com as especificações para cor 255,255,255

Options>Reflection>Diffuse Reflection>100%

Options>Reflection>Diffuse Reflection>Glow>20%

No tratamento de imagem foi retirado o efeito de sombreado com o comando:

Display Options>Render Zone Options>Shading>shading shadows desmarcado

Display Options>Render Zone Options>Scene>Backgraound>0,0,0

Na construção da geometria do modelo CAD C foram utilizados basicamente, para construir as lajes e depois para construir as paredes os comandos:

3D Extrusion

3D Enclosure

Boolean Split

Difference

Na modelagem da cobertura foram utilizados, para construir as curvas em balanço e a superfície maior, os comandos:

3D Enclosure

Difference

Nurbz>By Boundary Curves

3D Extrusion>0,40

Union

As perspectivas isométricas foram visualizadas, para vista com orientação sudeste, sudoeste, noroeste e nordeste nesta sequência, com os comandos:

View>z=45° e x=45°

View>Custom View Angles>z=-45° e x=45°

View>Custom View Angles>z=-135° e x=85°

View>Custom View Angles>z=135° e x=85°

Após a visualização de cada uma das vistas o comando:

Display>Render Zone

File>Export Image>formato JPG

com os respectivos nomes, Sudoeste C, Sudeste C, Nordeste C e Noroeste C.

A partir do modelo CAD C foi acionado, para obter o arquivo Modelo CAD C.stl, o comando:

File>Export>STL

O software FormZ apresentou na tela um aviso detectando erro no arquivo para exportar no formato STL e sugeriu para encontrar e consertar possíveis erros a utilização do comando:

Object Doctor Tools

Object Doctor>Tools Options>General All>Facetted All>Smooth All

Action>Fix if possible

Display results>selecionado

Facetted>Collinear Segments>8 foram corrigidos

Dessa forma foi possível gerar, a partir do modelo C, o arquivo padrão STL com sucesso, sem retrabalho de modelagem.

8.2 Fase 2 (Planejamento)

Na segunda fase do experimento foi possível obter as imagens necessárias para testar a primeira etapa de verificação da hipótese desta pesquisa. A verificação da ocorrência de interoperabilidade completa entre os sistemas envolvidos consiste em que todas as informações geométricas, necessárias para representar o modelo, sejam exportadas do sistema CAD e importadas pelo sistema de prototipagem rápida, de maneira a produzir um modelo físico seguindo as configurações pré-definidas nesta etapa.

8.2.1 Software Zprint

No *software* da impressora tridimensional da ZCorporation, o ZPrint 7.1, os arquivos com formato STL de cada um dos modelos A (Revit), B (AutoCAD) e C (FormZ) foram importados, um de cada vez, e seguiram a mesma sequência de configuração para fabricação do protótipo, pelo comando:

File>Open>STL

No momento em que o arquivo STL é aberto automaticamente, surge a opção para definir a Unidade do modelo e não acrescentar suporte para apoio do modelo:

Millimeters>Next

Exit

Para ajustar a visualização do modelo foram utilizados os comandos:

3D Views>Zoom to Fit

3D Views>Display Build Box>desmarcar

3D Views>Background Colors>Choose from Palettes>Black

As vistas foram ajustadas pelo botão central do *mouse*, com pontos de vista similares àqueles definidos nas vistas dos modelos CAD. Cada imagem foi obtida por meio da tecla *print screen* do teclado e colada no quadro comparação da Fase 1 com a Fase 2, para edição do tamanho. Cada modelo importado teve sua geometria observada, de maneira que se pode verificar se todos os elementos foram importados.

Foi possível observar que todos os elementos geométricos que formam cada modelo A, B e C foram importados integralmente no *software* do sistema de prototipagem da impressora Zprinter, não havendo necessidade de retrabalho do modelo. A partir dessa confirmação o arquivo pode ser preparado para a fase seguinte, fabricação.

Foi utilizado para definição da escala em 1:100 o comando :

Transform>Scale> Fit to X=120 mm

Para posicionar o modelo na base da impressora tridimensional foi utilizado o comando:

Transform>Justify>Center>Front>Bottom

Finalmente as configurações de cada modelo importado foram salvas no formato ZBD com o comando:

File>Save

8.2.2 *Software* ReplicatorG

No *software* da impressora tridimensional da Thing-O-Matic, o ReplicatorG 29, os arquivos com formato STL de cada um dos modelos A, B e C foram importados pelo comando:

File>Open>STL

O *software* não oferece recursos para configuração da imagem com o modelo na cor branca e fundo totalmente preto. A escala foi definida em 1:200, pela limitação do tamanho da base para impressão, no comando:

Scale Object>5>Scale

As vistas foram ajustadas pelo botão central do *mouse*, com pontos de vista similares àqueles definidos nas vistas dos modelos CAD. No intuito de obter cada imagem foi utilizada a tecla *print screen* do teclado e colada no quadro comparação da Fase 1 com a Fase 2. Cada modelo importado teve sua geometria observada, de maneira que se pode verificar se todos os elementos foram importados.

Foi possível observar que todos os elementos geométricos que formam cada modelo A, B e C foram importados integralmente no *software* do sistema de prototipagem da impressora Thing-O-Matic, não havendo necessidade de retrabalho do modelo. A partir dessa confirmação o arquivo pode ser preparado para a fase seguinte, a fabricação.

Após a geração das imagens, o modelo foi rotacionado na plataforma de construção, considerando as condições do tipo de processo de adição de material, com o comando:

Rotate>Y -

Move>Center>Put on plataform

Por último aciona-se o comando:

Generate GCode

Use Raft, Use Support Material>Exterior Support

Use Print-O-Matic (Stepper Extruders Only)

Object in Fill (%) = 100

Layer Height (mm) = .31

Number of Shells = 1

Feedrate9mm/s) = 40

Cada arquivo de Modelo CAD A, B e C gerou um arquivo GCode com as configurações finais pré-definidas para a próxima fase.

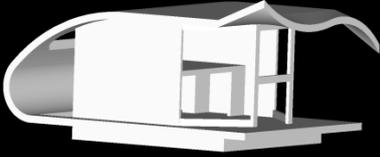
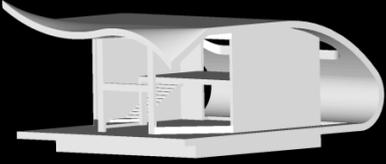
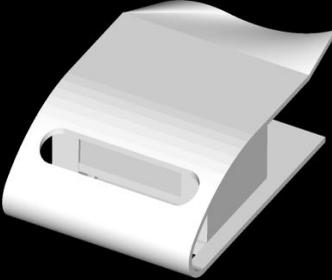
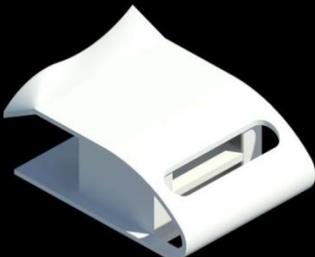
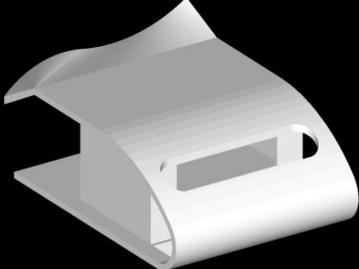
Nos quadros a seguir podem-se observar os resultados obtidos na Fase1 (CAD), comparados com os resultados da Fase 2 (planejamento) do experimento. Na primeira coluna são apresentadas as imagens das vistas externas obtidas na Fase 1 CAD, as quantidades e os tipos de elementos geométricos. Na segunda coluna, as imagens obtidas com as vistas equivalentes do modelo CAD, importado pelo *software* da impressora tridimensional, as quantidades e os tipos de elementos geométricos. A última coluna registra a verificação sobre as três maneiras que podem ocorrer a transferência das informações, do modelo CAD original para o *software* de prototipagem:

a) geometrias integralmente importadas, quando todos os elementos de cada tipo de geometria do modelo são importados e representados integralmente;

b) geometrias parcialmente importadas, quando parte ou alguns dos elementos de cada tipo de geometria do modelo são importados e representados integralmente; ou

c) geometrias não importadas, quando nenhum dos elementos de cada tipo de geometria do modelo é importado e representado integralmente.

Quadro 10 - Comparação entre os resultados da Fase 1 e da Fase 2 (Modelo AZ)

FASE 1 Imagem Modelo CAD A (REVIT)		FASE 2 Imagem Modelo AZ (ZPRINT)		RESULTADOS FASE 1 x FASE 2
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
QTD	TIPO DE GEOMETRIA DO MODELO	QTD	TIPO DE GEOMETRIA DO MODELO	RESULTADOS FASE 1 x FASE 2
01	Base	01	Base	Geometria importada integralmente
01	Piso Externo com Elemento Vazado	01	Piso Externo com Elemento Vazado	Geometrias importadas integralmente
06	Vigas Frontais Externas	06	Vigas Frontais Externas	Geometrias importadas integralmente
02	Pilares Externos	02	Pilares Externos	Geometrias importadas integralmente
02	Paredes Laterais	02	Paredes Laterais	Geometrias importadas integralmente
02	Paredes Fundos	02	Paredes Fundos	Geometrias importadas integralmente
01	Cobertura Maior: Curva com Elemento Vazado e Plano	01	Cobertura Maior: Curva com Elemento Vazado e Plano	Geometrias importadas integralmente
01	Curva Menor	01	Curva Menor	Geometrias importadas integralmente
01	Cobertura em Balanço: Superfície Complexa	01	Cobertura em Balanço: Superfície Complexa	Geometria importada integralmente
01	Elementos internos: Escada	01	Elementos internos: Escada	Geometrias importadas integralmente
01	Pilar	01	Pilar	
01	Laje Mezanino	01	Laje Mezanino	
04	Paredes Internas	04	Paredes Internas	
02	Vigas Fundos	02	Vigas Fundos	

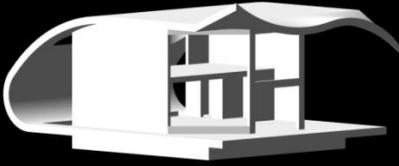
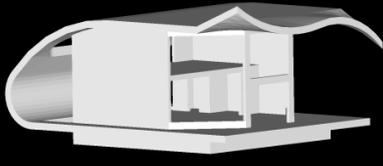
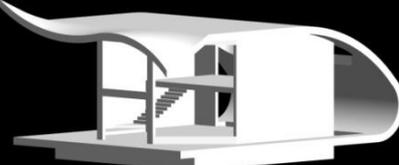
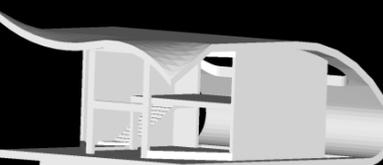
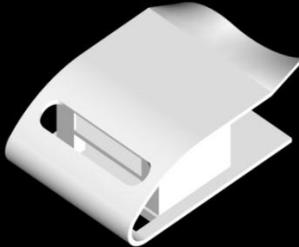
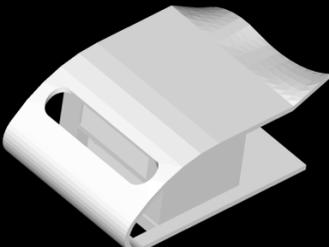
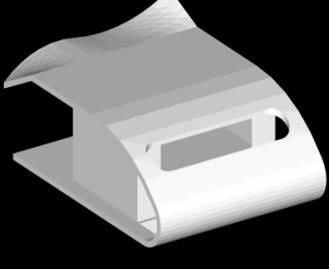
Fonte: Autoria nossa

Quadro 11 - Comparação entre os resultados da Fase 1 e da Fase 2 (Modelo BZ)

FASE 1 Imagem Modelo CAD B (AUTOCAD)		FASE 2 Imagem Modelo BZ (ZPRINT)		RESULTADOS FASE 1 x FASE 2
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
QTD	TIPO DE GEOMETRIA DO MODELO	QTD	TIPO DE GEOMETRIA DO MODELO	RESULTADOS FASE 1 x FASE 2
01	Base	01	Base	Geometria importada integralmente
01	Piso Externo com Elemento Vazado	01	Piso Externo com Elemento Vazado	Geometrias importadas integralmente
06	Vigas Frontais Externas	06	Vigas Frontais Externas	Geometrias importadas integralmente
02	Pilares Externos	02	Pilares Externos	Geometrias importadas integralmente
02	Paredes Laterais	02	Paredes Laterais	Geometrias importadas integralmente
02	Paredes Fundos	02	Paredes Fundos	Geometrias importadas integralmente
01	Cobertura Maior: Curva com Elemento Vazado e Plano	01	Cobertura Maior: Curva com Elemento Vazado e Plano	Geometrias importadas integralmente
01	Curva Menor	01	Curva Menor	Geometrias importadas integralmente
01	Cobertura em Balanço: Superfície Complexa	01	Cobertura em Balanço: Superfície Complexa	Geometria importada integralmente
01	Elementos internos: Escada	01	Elementos internos: Escada	Geometrias importadas integralmente
01	Pilar	01	Pilar	Geometrias importadas integralmente
01	Laje Mezanino	01	Laje Mezanino	Geometrias importadas integralmente
04	Paredes Internas	04	Paredes Internas	Geometrias importadas integralmente
02	Vigas Fundos	02	Vigas Fundos	Geometrias importadas integralmente

Fonte: Autoria nossa

Quadro 12 - Comparação entre os resultados da Fase 1 e da Fase 2 (Modelo CZ)

FASE 1 Imagem Modelo CAD B (AUTOCAD)		FASE 2 Imagem Modelo BZ (ZPRINT)		RESULTADOS FASE 1 x FASE 2
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
QTD	TIPO DE GEOMETRIA DO MODELO	QTD	TIPO DE GEOMETRIA DO MODELO	RESULTADOS FASE 1 x FASE 2
01	Base	01	Base	Geometria importada integralmente
01	Piso Externo com Elemento Vazado	01	Piso Externo com Elemento Vazado	Geometrias importadas integralmente
06	Vigas Frontais Externas	06	Vigas Frontais Externas	Geometrias importadas integralmente
02	Pilares Externos	02	Pilares Externos	Geometrias importadas integralmente
02	Paredes Laterais	02	Paredes Laterais	Geometrias importadas integralmente
02	Paredes Fundos	02	Paredes Fundos	Geometrias importadas integralmente
01	Cobertura Maior:	01	Cobertura Maior:	Geometrias importadas integralmente
01	Curva com Elemento Vazado e Plano	01	Curva com Elemento Vazado e Plano	Geometrias importadas integralmente
01	Curva Menor	01	Curva Menor	Geometrias importadas integralmente
01	Cobertura em Balanço: Superfície Complexa	01	Cobertura em Balanço: Superfície Complexa	Geometria importada integralmente
01	Elementos internos:	01	Elementos internos:	Geometrias importadas integralmente
01	Escada	01	Escada	Geometrias importadas integralmente
01	Pilar	01	Pilar	Geometrias importadas integralmente
01	Laje Mezanino	01	Laje Mezanino	Geometrias importadas integralmente
04	Paredes Internas	04	Paredes Internas	Geometrias importadas integralmente

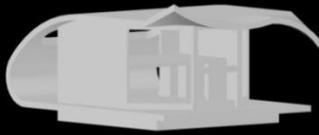
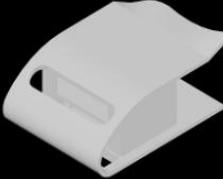
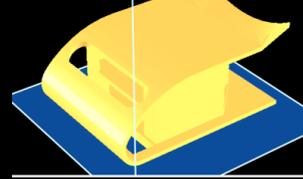
Fonte: Autoria nossa

Quadro 13 - Comparação entre os resultados da Fase 1 e da Fase 2 (Modelo AX)

FASE 1 Imagem Modelo CAD A (REVIT)		FASE 2 Imagem Modelo AX (ReplicatorG)		RESULTADOS FASE 1 x FASE 2
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
QTD	TIPO DE GEOMETRIA DO MODELO	QTD	TIPO DE GEOMETRIA DO MODELO	RESULTADOS FASE 1 x FASE 2
01	Base	01	Base	Geometria importada integralmente
01	Piso Externo com Elemento Vazado	01	Piso Externo com Elemento Vazado	Geometrias importadas integralmente
06	Vigas Frontais Externas	06	Vigas Frontais Externas	Geometrias importadas integralmente
02	Pilares Externos	02	Pilares Externos	Geometrias importadas integralmente
02	Paredes Laterais	02	Paredes Laterais	Geometrias importadas integralmente
02	Paredes Fundos	02	Paredes Fundos	Geometrias importadas integralmente
01	Elementos internos:	01	Elementos internos:	Geometrias importadas integralmente
01	Escada	01	Escada	
01	Pilar	01	Pilar	
01	Laje Mezanino	01	Laje Mezanino	
04	Paredes Internas	04	Paredes Internas	
02	Vigas Fundos	02	Vigas Fundos	
01	Cobertura Maior:	01	Cobertura Maior:	Geometrias importadas integralmente
01	Curva com Elem. Vazado e Plano	01	Curva com Elem. Vazado e Plano	
01	Curva Menor	01	Curva Menor	
01	Cobertura em Balanço:	01	Cobertura em Balanço:	Geometria importada integralmente
	Superfície Complexa		Superfície Complexa	

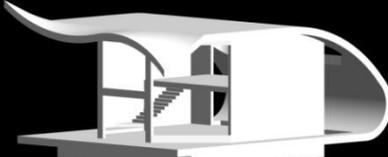
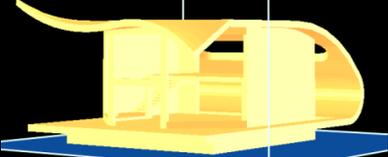
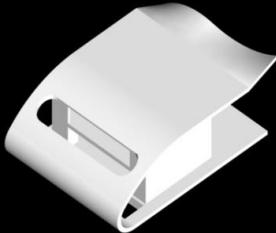
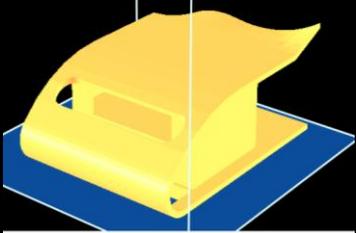
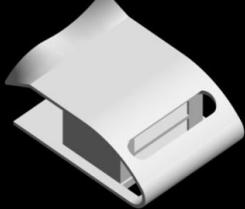
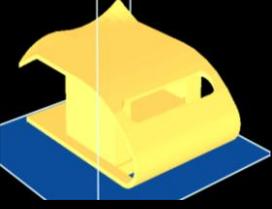
Fonte: Autoria nossa

Quadro 14 - Comparação entre os resultados da Fase 1 e da Fase 2 (Modelo BX)

FASE 1 Imagem Modelo CAD B (AUTOCAD)		FASE 2 Imagem Modelo BX (ReplicatorG)		RESULTADOS FASE 1 x FASE 2
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
QTD	TIPO DE GEOMETRIA DO MODELO	QTD	TIPO DE GEOMETRIA DO MODELO	RESULTADOS FASE 1 x FASE 2
01	Base	01	Base	Geometria importada integralmente
01	Piso Externo com Elemento Vazado	01	Piso Externo com Elemento Vazado	Geometrias importadas integralmente
06	Vigas Frontais Externas	06	Vigas Frontais Externas	Geometrias importadas integralmente
02	Pilares Externos	02	Pilares Externos	Geometrias importadas integralmente
02	Paredes Laterais	02	Paredes Laterais	Geometrias importadas integralmente
02	Paredes Fundos	02	Paredes Fundos	Geometrias importadas integralmente
01	Elementos internos:	01	Elementos internos:	Geometrias importadas integralmente
01	Escada	01	Escada	
01	Pilar	01	Pilar	
01	Laje Mezanino	01	Laje Mezanino	
04	Paredes Internas	04	Paredes Internas	
02	Vigas Fundos	02	Vigas Fundos	
01	Cobertura Maior:	01	Cobertura Maior:	Geometrias importadas integralmente
01	Curva com Elem. Vazado e Plano	01	Curva com Elem. Vazado e Plano	
01	Curva Menor	01	Curva Menor	Geometria importada integralmente
01	Cobertura em Balanço:	01	Cobertura em Balanço:	
	Superfície Complexa		Superfície Complexa	

Fonte: Autoria nossa

Quadro 15 - Comparação entre os resultados da Fase 1 e da Fase 2 (Modelo CX)

FASE 1 <i>Imagem Modelo CAD C (FORMZ)</i>		FASE 2 <i>Imagem Modelo CX (ReplicatorG)</i>		RESULTADOS FASE 1 x FASE 2
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
				Geometrias importadas integralmente
QTD	TIPO DE GEOMETRIA DO MODELO	QTD	TIPO DE GEOMETRIA DO MODELO	RESULTADOS FASE 1 x FASE 2
01	Base	01	Base	Geometria importada integralmente
01	Piso Externo com Elemento Vazado	01	Piso Externo com Elemento Vazado	Geometrias importadas integralmente
06	Vigas Frontais Externas	06	Vigas Frontais Externas	Geometrias importadas integralmente
02	Pilares Externos	02	Pilares Externos	Geometrias importadas integralmente
02	Paredes Laterais	02	Paredes Laterais	Geometrias importadas integralmente
02	Paredes Fundos	02	Paredes Fundos	Geometrias importadas integralmente
01	Cobertura Maior: Curva com Elem. Vazado e Plano	01	Cobertura Maior: Curva com Elem. Vazado e Plano	Geometrias importadas integralmente
01	Curva Menor	01	Curva Menor	Geometrias importadas integralmente
01	Cobertura em Balanço: Superfície Complexa	01	Cobertura em Balanço: Superfície Complexa	Geometria importada integralmente
01	Elementos internos: Escada	01	Elementos internos: Escada	Geometrias importadas integralmente
01	Pilar	01	Pilar	Geometrias importadas integralmente
01	Laje Mezanino	01	Laje Mezanino	Geometrias importadas integralmente
04	Paredes Internas	04	Paredes Internas	Geometrias importadas integralmente
02	Vigas Fundos	02	Vigas Fundos	Geometrias importadas integralmente

Fonte: Autoria nossa

O quadro a seguir apresenta o tamanho em KB (Kilobyte), de cada um dos arquivos de modelo CAD, os seus respectivos arquivos STL e o número de faces existente em cada modelo:

Quadro 16 - Tamanho dos arquivos dos modelos CAD, STL e número de faces

FORMATO	MODELO A (REVIT)	MODELO B (AUTOCAD)	MODELO C (FORMZ)
MODELO CAD	26.696 KB	318 KB	672 KB
ARQUIVO STL	1.560 KB	69 KB	69 KB
Nº FACES	6.340	1.402	1.398

Fonte: Autoria nossa

Os *softwares* de prototipagem Zprint 7.10 e ReplicatorG 29, nessas versões, não fornecem as informações sobre a quantidade de faces dos objetos que formam cada modelo A (Revit), B (AutoCAD) e C (FormZ). Entre os *softwares* CAD escolhidos para elaborar o experimento, somente o FormZ permite importar o arquivo STL. Observamos também que este arquivo pode ser exportado pelo FormZ e pelos outros *softwares*.

Os arquivos obtidos a partir do mesmo sistema CAD específico - Revit Architecture 2012, tanto o modelo CAD como o formato STL, apresentam o maior tamanho em KB (Kilobyte) e mais de quatro vezes a quantidade de faces dos objetos do modelo. No caso dos arquivos obtidos a partir dos sistemas CAD genéricos - AutoCAD 2012 e FormZ 6.7.3, mesmo com o arquivo do modelo CAD C tendo o dobro do tamanho em Kilobytes, o seu arquivo formato STL possui tamanho igual ao modelo CAD B que, por sua vez, também resultam em número de faces dos objetos praticamente iguais entre si.

8.3 Fase 3 (Fabricação no sistema de prototipagem rápida)

A terceira fase consistiu na produção dos modelos CAD A, B e C, gerados em diferentes sistemas CAD, a partir de dois diferentes tipos de sistemas de prototipagem rápida, por processo de adição de camadas. Os resultados foram seis protótipos rápidos, baseados em um mesmo projeto, sendo três modelos obtidos na impressora 3DP Zprinter (Z), em escala 1:100, e os outros três modelos obtidos a partir da impressora FDM Thing-O-Matic (X), em escala 1:200.

Os arquivos das impressoras anteriormente configurados na Fase 2 (planejamento) foram abertos no *software* de cada impressora tridimensional, um de cada vez, e as informações sobre o tempo estimado de fabricação do protótipo e a quantidade de material foram obtidas, conforme descreve o quadro a seguir:

Quadro 17 - Tempo e material gasto no processo de prototipagem dos experimentos

SISTEMA CAD + SISTEMA PROTOTIPAGEM RÁPIDA	TEMPO DE FABRICAÇÃO	MATERIAL UTILIZADO
Protótipo Rápido AZ (Modelo CAD A + Impressora Zprinter)	2 horas 58 minutos (+1 hora espera para cura do material)	117,50 ml (Aglutinante ZBinder 60) 271.011,15 mm ³ (Pó ZP150)
Protótipo Rápido BZ (Modelo CAD B + Impressora Zprinter)	2 horas 58 minutos (+1 hora espera para cura do material)	112,80 ml (Aglutinante ZBinder 60) 271.079,00 mm ³ (Pó ZP150)
Protótipo Rápido CZ (Modelo CAD C + Impressora Zprinter)	2 horas 57 minutos (+1 hora espera para cura do material)	116,50 ml (Aglutinante ZBinder 60) 271.295,20 mm ³ (Pó ZP150)
Protótipo Rápido AX (Modelo CAD A + Imp. Thing-O-Matic)	2 horas 36 minutos 17 segundos	(Plástico ABS Branco e=0,175 mm) quantidade não informada pelo <i>software</i>
Protótipo Rápido BX (Modelo CAD B + Imp. Thing-O-Matic)	2 horas 29 minutos	(Plástico ABS Branco e=0,175 mm) quantidade não informada pelo <i>software</i>
Protótipo Rápido CX (Modelo CAD C + Imp. Thing-O-Matic)	2 horas 27 minutos 58 segundos	(Plástico ABS Branco e=0,175 mm) quantidade não informada pelo <i>software</i>

Fonte: Autoria nossa

Na impressora Zprinter foi utilizado como material sólido o pó (*powder*) ZP 150, associado ao líquido aglutinante zb60 *clear* fornecido pelo fabricante ZCorporation. As instruções recomendadas no manual do fabricante foram seguidas para a utilização do equipamento. O processo de prototipagem na Zprinter iniciou-se com uma barra com cabeçote aplicando o líquido aglutinante no formato da base do modelo, na plataforma direita do equipamento. Em seguida, quando a barra retorna para a direita, traz uma camada do material sólido contido na plataforma do lado esquerdo.

Este processo se repete sucessivamente até completar o formato do modelo, em várias fatias de baixo para cima. Enquanto a plataforma do lado esquerdo sobe diminuindo o material sólido, o lado direito desce com o modelo totalmente coberto por dentro e por fora pelo pó. Ao término do processo, o fabricante da impressora Zprinter recomenda aguardar pelo menos 1 hora, antes de dar início à retirada do protótipo de dentro do equipamento.

As fotos da Figura 35 a seguir apresentam a sequência, da esquerda para direita, do início meio e término do processo de fabricação dos modelos CAD A, B e C utilizando a impressora tridimensional, modelo Zprinter 310 plus monocromática da ZCorporation:



Figura 35 - Fotos do processo de fabricação na impressora ZCorporation

Fonte: Arquivo pessoal

No caso da impressora modelo Thing-O-Matic, o material sólido utilizado foi o ABS com espessura igual a 0,175 mm na cor branca. A impressão foi iniciada após o aquecimento do material que desce do bico extrusor, que percorreu o caminho com o formato do perfil lateral do modelo, expelindo o plástico derretido. A base da impressora também possui temperatura alta, para manter o material em condições de adicionar as próximas camadas. O processo repete-se sucessivamente até completar todas as camadas sobrepostas do modelo. O protótipo permanece com temperatura alta por alguns minutos. Ao esfriar o material permanece rígido.

O processo de fabricação dos modelos CAD A, B e C utilizando a impressora FDM (*Fused Deposition Modeling*) modelagem por deposição e fusão, modelo Thing-O-Matic da MakerBot é apresentado na figura abaixo:

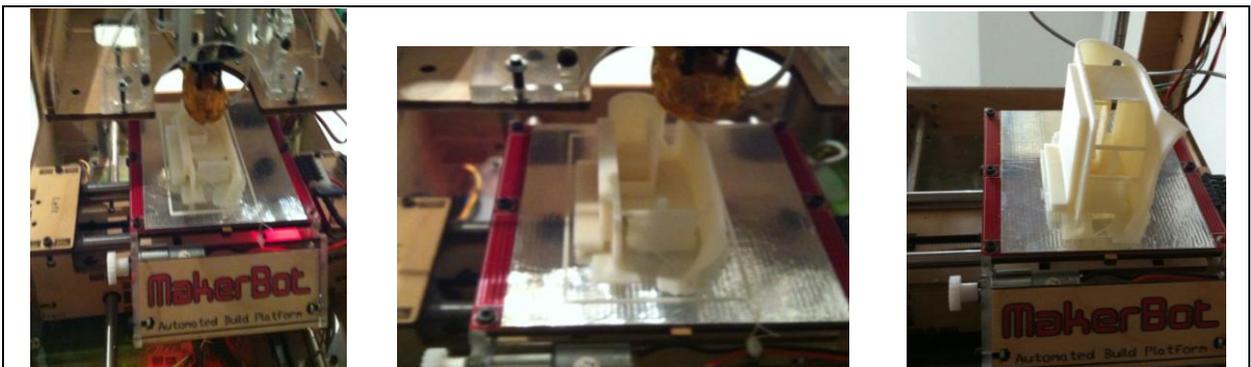


Figura 36 - Fotos do processo de fabricação na impressora Thing-O-Matic da MakerBot

Fonte: Arquivo pessoal

8.4 Fase 4 (acabamento)

Na última Fase 4 (acabamento) os protótipos rápidos AZ, BZ e CZ foram obtidos, um de cada vez, na impressora Zprinter. No primeiro momento, foi necessário remover o pó da parte de cima e dos lados do protótipo, com o auxílio de um pincel, devido à fragilidade do material.

No processo de limpeza do protótipo CZ, um dos pilares e viga da fachada norte foram quebrados e em seguida foram colados com cola de cianocrilato (super bonder).

A sequência do processo de limpeza pode ser observada na figura abaixo:



Figura 37 - Fotos do processo de limpeza do protótipo na impressora Zprinter

Fonte: Arquivo pessoal

Cada um dos protótipos foi retirado da impressora e levado para a estação de reciclagem de pó, que acompanha o equipamento da ZCorporation. O pó que ainda estava contido dentro do protótipo foi retirado utilizando um compressor de ar. De maneira a reforçar a resistência dos protótipos foi aplicado, nas superfícies externas, o material Z-Bond 101 que possui consistência bastante viscosa, inodoro, transparente e de rápida secagem.

Por causa dessas características do material, a melhor opção foi utilizar luvas cirúrgicas para aplicar e espalhar o material sobre o protótipo. A seguir, a figura 38 apresenta os equipamentos de estação de reciclagem de pó, impressora Zprinter e microcomputador do laboratório de Fabricação Digital e Customização em Massa (LFDC).

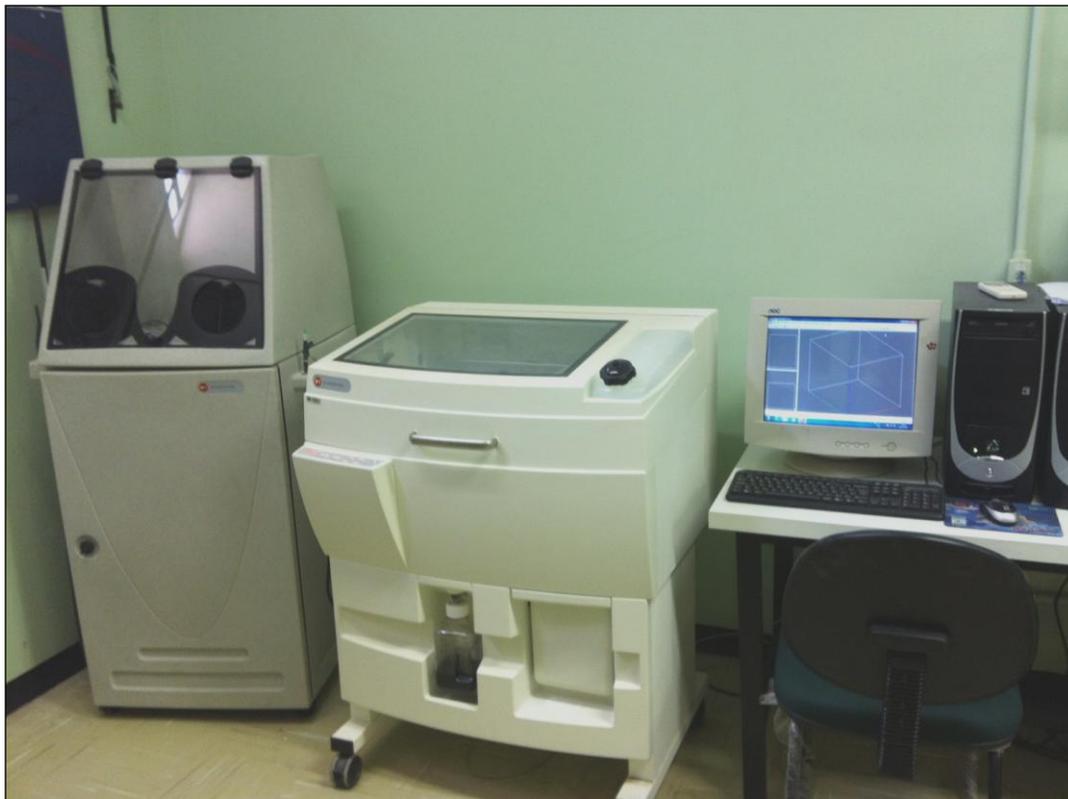


Figura 38 - Fotos dos equipamentos de prototipagem rápida do LFDC

Fonte: Arquivo pessoal

Após a resinação, o aspecto final dos protótipos não se mostrou uniforme e algumas superfícies apresentavam a resina acumulada, formando bolhas - para retirar o excesso do material foi empregada uma lixa fina. A preocupação na fase do acabamento foi a de não alterar a geometria do protótipo, para não interferir na avaliação dos resultados deste experimento. O tempo gasto no processo de acabamento dos protótipos, produzidos na Zprinter, variou entre 3 a 4 horas para cada protótipo.

No caso dos protótipos rápidos AX, BX e CX fabricados pela impressora Thing-O-Matic, o acabamento foi basicamente retirar o suporte com alicate e lixa fina, nas partes com saliência de material plástico. O tempo gasto nesse processo variou entre 30 a 60 minutos para cada protótipo.

Todos os seis protótipos rápidos finalizados na Fase 4 (acabamento) foram fotografados, considerando os mesmos pontos de vista definidos anteriormente nas imagens dos modelos CAD A, B e C. O equipamento fotográfico utilizado foi a máquina fotográfica digital marca Sony modelo nex7. As fotos dos protótipos rápidos AX, AZ, BX, BZ, CX e CZ são apresentadas nos quadros a seguir, no capítulo 9, Análise de Resultados e no Apêndice D.

9 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos da Fase 1 (modelagem no sistema CAD), Fase 2 (planejamento) e Fase 4 (acabamento) foram utilizados para verificar a hipótese em duas etapas distintas.

A primeira etapa consistiu em verificar a interoperabilidade entre os diferentes *softwares* de sistemas CAD e os *softwares* de prototipagem rápida. Os resultados obtidos na Fase 1 (modelagem no sistema CAD) foram organizados nos quadros a seguir, com a primeira coluna contendo, nas linhas superiores, as imagens das vistas externas renderizadas do modelo CAD, para efeito de registro da observação efetuada. Nas linhas abaixo das imagens a coluna é subdividida, informando a quantidade e depois o tipo de geometria com as dimensões em largura, profundidade e altura, na unidade em metro. Os aspectos de resolução das formas curvas e superfícies complexas foram descritos, conforme quantidade e formato das faces representadas.

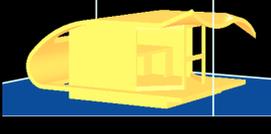
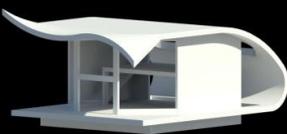
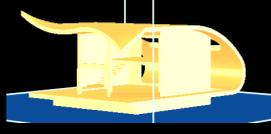
A segunda coluna informa os resultados obtidos a partir da verificação efetuada nas imagens do modelo importado na Fase 2 (planejamento), apresentada nas primeiras linhas. A coluna é subdividida, abaixo das imagens, para descrever a quantidade e o tipo de geometria, especificando a condição de interoperabilidade entre geometrias integralmente importadas, parcialmente importadas, ou geometrias não importadas.

A terceira coluna registra as imagens das fotos obtidas dos protótipos rápidos, Fase 4 (acabamento), com as vistas equivalentes às do modelo CAD original. De maneira a verificar a hipótese na segunda etapa, os graus de semelhança geométrica formal entre estes modelos foram comparados. Nas linhas superiores, as imagens permitiram registrar o grau de resolução das formas. No sentido de permitir comparação entre os modelos, logo abaixo de suas respectivas imagens, a coluna é subdividida, informando a quantidade e depois o tipo de geometria com as dimensões em largura, profundidade e altura, na unidade em metro.

Os aspectos de resolução das formas curvas e superfícies complexas também foram descritos, conforme quantidade e formato das faces representadas. A seguir, o Quadro 18 reúne todos os resultados obtidos em cada fase de elaboração

do experimento utilizando o modelo CAD A (Revit) e a impressora tridimensional Thing-O-Matic (X).

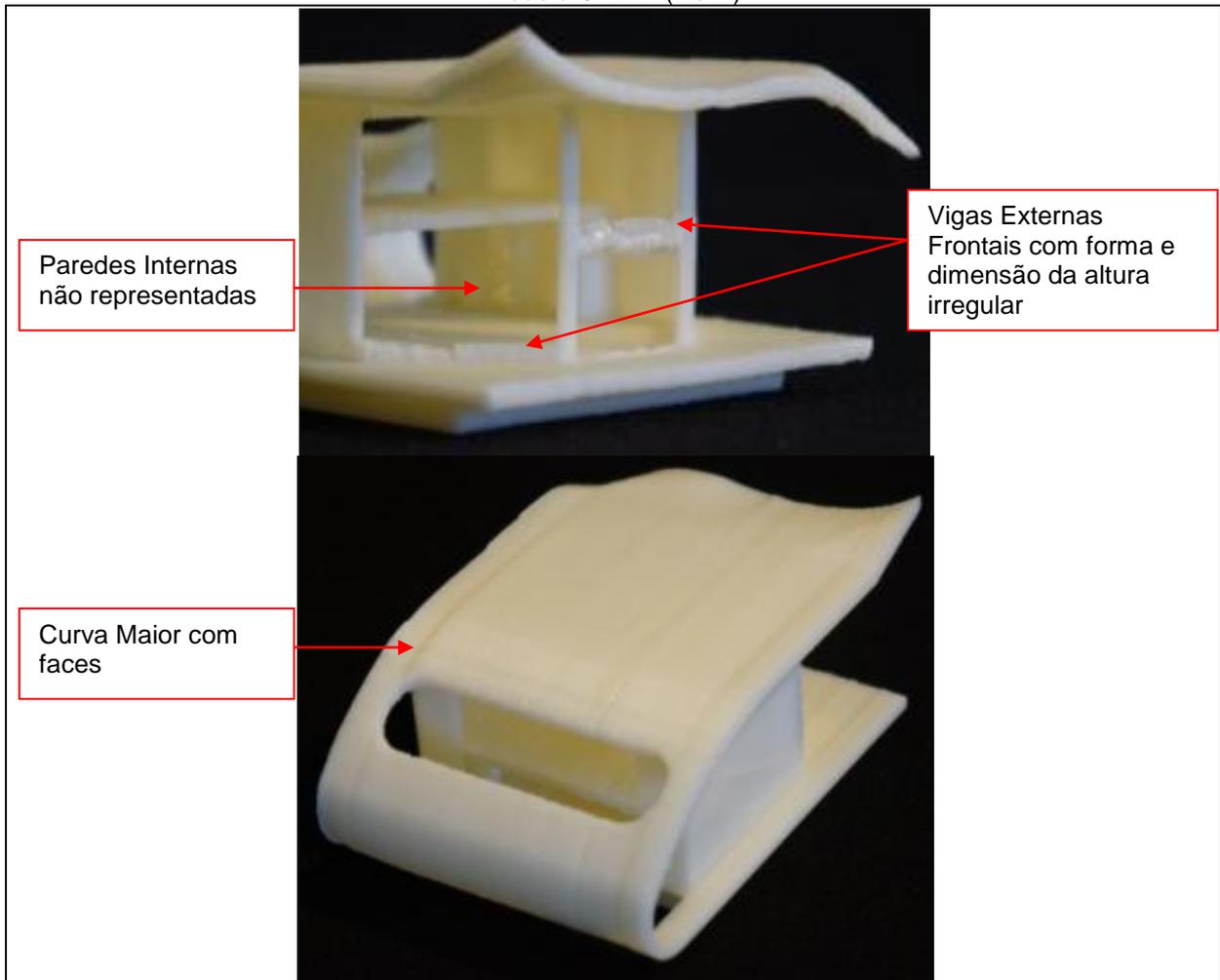
Quadro 18 - Comparação entre os resultados da Fase 1, Fase 2 e Fase 4 (Modelo AX)

FASE 1 Imagem Modelo CAD A (Revit)		FASE 2 Imagem Modelo AX (ReplicatorG)		FASE 4 Foto Protótipo AX (Thing-O-Matic)	
					
					
					
					
QTD	TIPO DE GEOMETRIA Modelo CAD (L x P x H) m	QTD	INTEROPERABILIDADE ENTRE OS SOFTWARES	QTD	TIPO DE GEOMETRIA Protótipo (L x P x H) m
01	Base = 10,00x10,00x0,80	01	Base: Geom. importada integralmente	01	Base = 10,00x10,00x0,80
01	Piso Externo=12,00x16,00x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40	01	Piso Externo com Elem. Vazado: Geom. importada integralmente	01	Piso Externo = 12,00x16,00x0,40* *parte removida com o suporte Elem. Vazado = 10,00x2,00x0,40
04 02	Vigas Externas Frontais= 4,25x0,20x0,40 3,20x0,20x0,40	06	Vigas Externas Frontais: Geometrias importadas integralmente	03 01 01	Vigas Externas Frontais: 4,25x0,20x0,40 4,25x0,20x0,40-0,20* 3,20x0,20x0,40 3,20x0,20-0,10x0,40-0,60* *forma e dimensão altura irregular
02	Pilares Externos= 0,40x0,20x5,20	02	Pilares Externos: Geometrias importadas integralmente	02	Pilares Externos: 0,40x0,20x5,20
02 02	Paredes Laterais= 0,20x7,00x5,60 Paredes Fundos= 0,20x1,70x4,80	04	Paredes Laterais: Geometrias importadas integralmente Paredes Fundos: Geometrias importadas integralmente	02 02	Paredes Laterais: 0,20x7,00x5,60 Paredes Fundos: 0,20x1,70x4,80
01 01 01 04 02	Elementos internos: Não medidos Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos	09	Elementos internos: Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos Geometrias importadas Integralmente	01 01 01 02 02	Elementos internos: (Não medidos) Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas 02 Paredes int. não representadas Vigas Fundos
01	Cobertura Curva Menor = 12,00x0,56x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura Curva Menor: Geometria importada integralmente Apresenta 22 faces	01	Cobertura Curva Menor = 12,00x0,56x0,40 Não apresenta faces planas
01	Cobertura Maior: Elemento Plano= 12,00x6,48x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40 Curva Maior= 12,00x6,96x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura Maior: Elemento plano Geometria importada integralmente Elemento Vazado Geometria importada integralmente Curva Maior Geometria importada integralmente Apresenta 10 faces	01	Cobertura Maior: Elemento Plano= 12,00x6,48x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40 Curva Maior= 12,00x6,96x0,40 Apresenta 10 faces
01	Cobertura em Balanço: Curva 1 = 6,90x3,00x0,40 Curva 2 = 5,10x3,00x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura em Balanço Geometria importada integralmente Não apresenta faces planas	01	Cobertura em Balanço: Curva 1 = 6,90x3,00x0,40 Curva 2 = 5,10x3,00x0,40 Não apresenta faces planas

Fonte: Autoria nossa (fotos do protótipo rápido: Sílvia Uehara)

O quadro abaixo destaca a imagem ampliada do quadro anterior, e as diferenças observadas no protótipo rápido AX (Thing-O-Matic) comparado ao modelo CAD A (Revit).

Quadro 19 - Diferenças na representação do protótipo rápido AX (Thing-O-Matic) comparado ao modelo CAD A (Revit)



Fonte: Autoria nossa

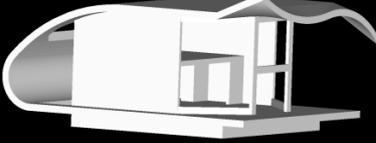
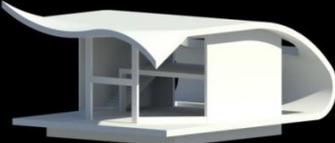
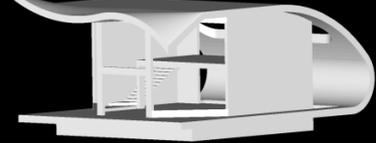
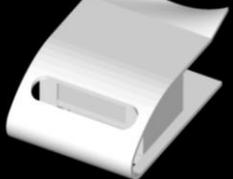
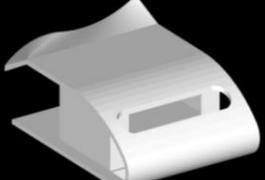
Em comparação com o modelo CAD A (Revit), o protótipo rápido AX da impressora Thing-O-Matic apresentou algumas falhas na construção de elementos geométricos, conforme destacado nas figuras acima. Estes problemas de prototipagem rápida provavelmente são decorrentes da maneira como o arquivo padrão STL gerou as informações para serem fabricadas, associado ao limite de precisão do equipamento e ao seu respectivo processo construtivo.

O grau de resolução da curva maior representada de forma facetada, caso necessário, pode ser modificado e a resolução aumentada para uma quantidade

maior de faces no modelo CAD A (Revit). As faces da curva menor, que são observadas no modelo importado pelo *software* ReplicatorG, não são visíveis no protótipo AX, provavelmente por causa da escala 1:200 adotada na referida prototipagem rápida.

A seguir, o Quadro 20 reúne todos os resultados obtidos em cada fase de elaboração do experimento (modelo CAD A (Revit) e impressora Zprinter (Z)).

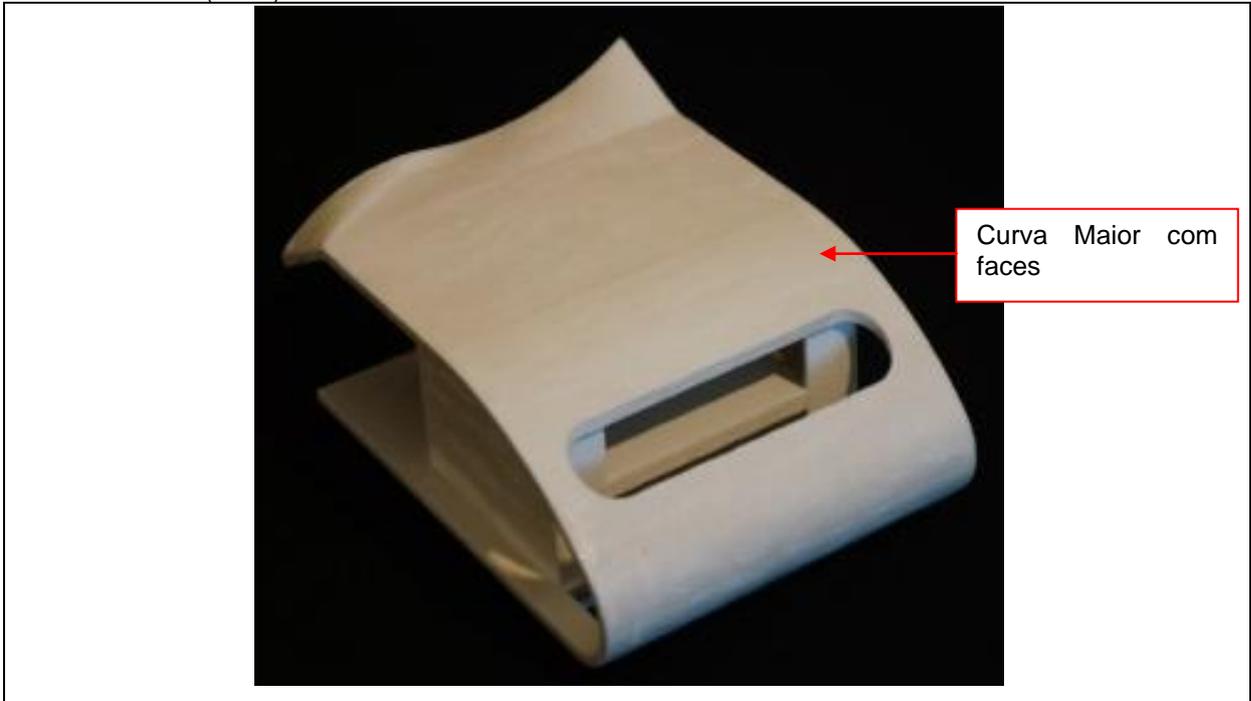
Quadro 20 - Comparação entre os resultados da Fase 1, Fase 2 e Fase 4 (Modelo AZ)

FASE 1 Imagem Modelo CAD A (Revit)		FASE 2 Imagem Modelo AZ (Zprint)		FASE 4 Foto Protótipo AZ (Zprinter)	
					
					
					
					
QTD	TIPO DE GEOMETRIA Modelo CAD (L x P x H) m	QTD	INTEROPERABILIDADE entre os softwares	QTD	TIPO DE GEOMETRIA Protótipo (L x P x H) m
01	Base = 10,00x10,00x0,80	01	Base: Geom. importada integralmente	01	Base = 10,00x10,00x0,80
01	Piso Externo=12,00x16,00x0,40 Elem. Vazado=10,00x2,00x0,40	01	Piso Externo com Elem. Vazado: Geom. importada integralmente	01	Piso Externo = 12,00x16,00x0,40 Elem. Vazado = 10,00x2,00x0,40
04 02	Vigas Externas Frontais= 4,25x0,20x0,40 3,20x0,20x0,40	06	Vigas Externas Frontais: Geometrias importadas integralmente	04 02	Vigas Externas Frontais= 4,25x0,20x0,40 3,20x0,20x0,40
02	Pilares Externos= 0,40x0,20x5,20	02	Pilares Externos: Geometrias importadas integralmente	02	Pilares Externos: 0,40x0,20x5,20
02	Paredes Laterais= 0,20x7,00x5,60 Paredes Fundos= 0,20x1,70x4,80	04	Paredes Laterais: Geometrias importadas integralmente Paredes Fundos: Geometrias importadas integralmente	02 02	Paredes Laterais: 0,20x7,00x5,60 Paredes Fundos: 0,20x1,70x4,80
01 01 01 04 02	Elementos internos: Não medidos Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos	09	Elementos internos: Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos Geometrias importadas Integralmente	01 01 01 04 02	Elementos internos: Não medidos Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos
01	Cobertura Curva Menor = 12,00x0,56x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura Curva Menor: Geometria importada integralmente Apresenta 28 faces	01	Cobertura Curva Menor = 12,00x0,56x0,40 Não apresenta faces planas
01	Cobertura Maior: Elemento Plano= 12,00x6,48x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40 Curva Maior= 12,00x6,96x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura Maior: Elemento plano Geometria importada integralmente Elemento Vazado Geometria importada integralmente Curva Maior Geometria importada integralmente Apresenta 10 faces	01	Cobertura Maior: Elemento Plano= 12,00x6,48x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40 Curva Maior= 12,00x6,96x0,40 Apresenta 10 faces
01	Cobertura em Balanço: Curva 1 = 6,90x3,00x0,40 Curva 2 = 5,10x3,00x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura em Balanço: Geometria importada integralmente Não apresenta faces planas	01	Cobertura em Balanço: Curva 1 = 6,90x3,00x0,40 Curva 2 = 5,10x3,00x0,40 Não apresenta faces planas

Fonte: Autoria nossa (fotos do protótipo rápido: Sílvio Uehara)

O quadro abaixo destaca a imagem ampliada do quadro anterior, e as diferenças observadas no protótipo rápido AZ (Zprinter) comparado ao modelo CAD A (Revit).

Quadro 21 - Diferença na representação do protótipo rápido AZ (Zprinter) comparado ao modelo CAD A (Revit)

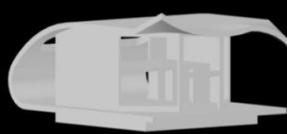
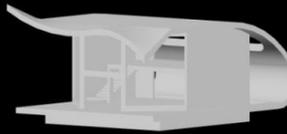
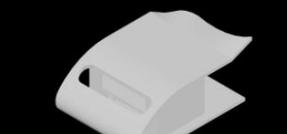
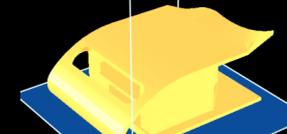


Fonte: Autoria nossa

A única diferença observada no protótipo AZ (Zprinter), comparado com o modelo CAD A (Revit), foi o grau de resolução da curva maior representada de forma facetada. Caso haja necessidade, a curva pode ser modificada e a resolução aumentada para uma maior quantidade de faces no modelo CAD A (Revit). As faces da curva menor, que são observadas no modelo importado pelo *software* Zprint, não são visíveis no protótipo AZ, provavelmente por causa da escala 1:100 adotada nesta prototipagem rápida.

A seguir, o Quadro 22 reúne todos os resultados obtidos em cada fase de elaboração do experimento, utilizando o modelo CAD B (AutoCAD) e a impressora tridimensional Thing-O-Matic (X).

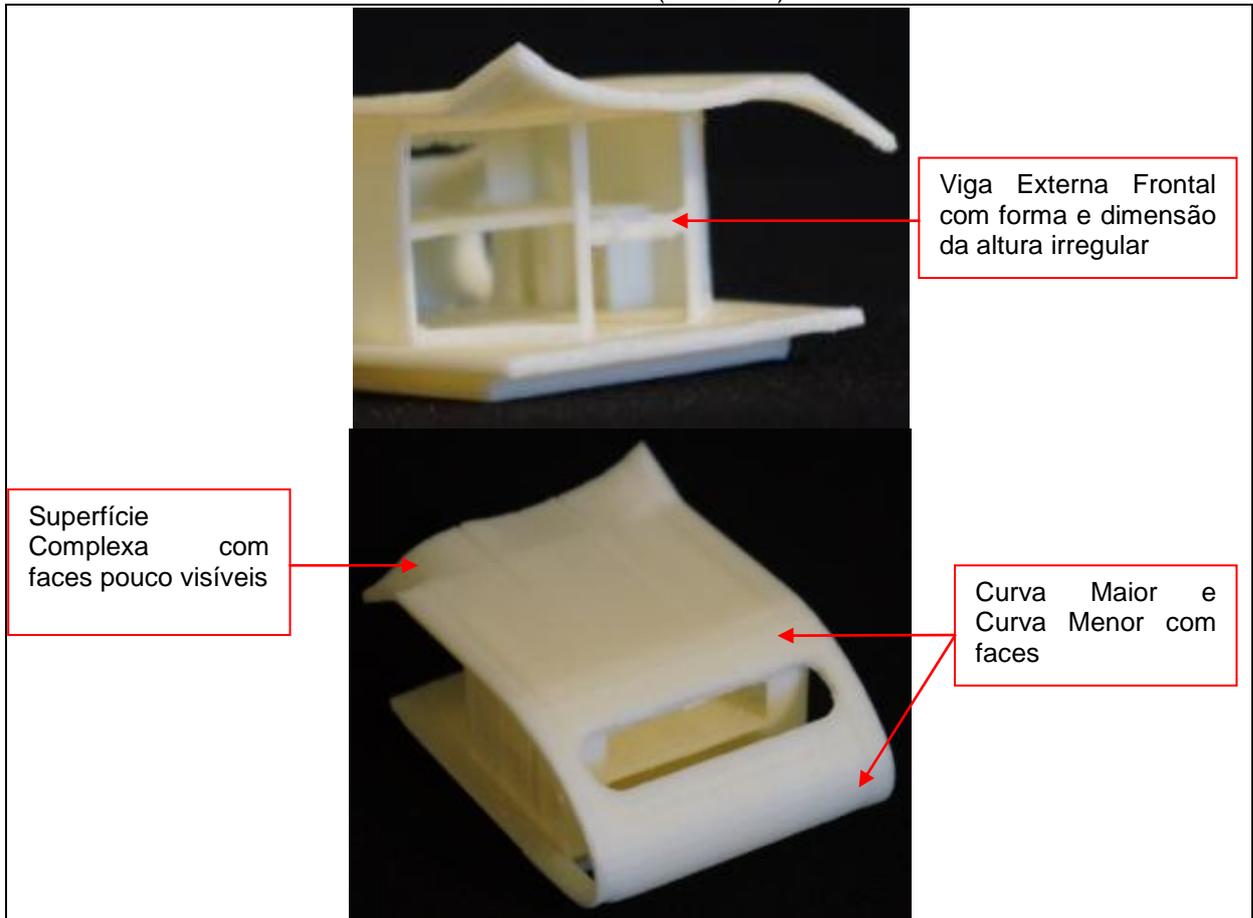
Quadro 22 - Comparação entre os resultados da Fase 1, Fase 2 e Fase 4 (Modelo BX)

FASE 1 Imagem Modelo CAD B (AutoCAD)		FASE 2 Imagem Modelo BX (ReplicatorG)		FASE 4 Foto Protótipo BX (Thing-O-Matic)	
					
					
					
					
QTD	TIPO DE GEOMETRIA Modelo CAD (L x P x H) m	QTD	INTEROPERABILIDADE entre os softwares	QTD	TIPO DE GEOMETRIA Protótipo (L x P x H) m
01	Base = 10,00x10,00x0,80	01	Base: Geom. importada integralmente	01	Base = 10,00x10,00x0,80
01	Piso Externo=12,00x16,00x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40	01	Piso Externo com Elem. Vazado: Geom. importada integralmente	01	Piso Externo = 12,00x16,00x0,40* *parte removida com o suporte Elem. Vazado = 10,00x2,00x0,40
04 02	Vigas Externas Frontais= 4,25x0,20x0,40 3,20x0,20x0,40	06	Vigas Externas Frontais: Geometrias importadas integralmente	04 01 01	Vigas Externas Frontais: 4,25x0,20x0,40 3,20x0,20x0,40 3,20x0,20-0,10x0,40-0,60* *forma e dimensão altura irregular
02	Pilares Externos= 0,40x0,20x5,20	02	Pilares Externos: Geometrias importadas integralmente	02	Pilares Externos: 0,40x0,20x5,20
02 02	Paredes Laterais= 0,20x7,00x5,60 Paredes Fundos= 0,20x1,70x4,80	04	Paredes Laterais: Geometrias importadas integralmente Paredes Fundos: Geometrias importadas integralmente	02 02	Paredes Laterais: 0,20x7,00x5,60 Paredes Fundos: 0,20x1,70x4,80
01 01 01 04 02	Elementos internos: Não medidos Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos	09	Elementos internos: Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos Geometrias importadas Integralmente	01 01 01 04 02	Elementos internos: Não medidos Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos
01	Cobertura Curva Menor = 12,00x0,56x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura Curva Menor: Geometria importada integralmente Apresenta 8 faces	01	Cobertura Curva Menor = 12,00x0,56x0,40 Apresenta 8 faces
01	Cobertura Maior: Elemento Plano= 12,00x6,48x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40 Curva Maior= 12,00x6,96x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura Maior: Elemento plano Geometria importada integralmente Elemento Vazado Geometria importada integralmente Curva Maior Geometria importada integralmente Apresenta 7 faces	01	Cobertura Maior: Elemento Plano= 12,00x6,48x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40 Curva Maior= 12,00x6,96x0,40 Apresenta 7 faces
01	Cobertura em Balanço: Curva 1 = 6,90x3,00x0,40 Curva 2 = 5,10x3,00x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura em Balanço Geometria importada integralmente Apresenta faces padrão irregular e regular	01	Cobertura em Balanço: Curva 1 = 6,90x3,00x0,40 Curva 2 = 5,10x3,00x0,40 Apresenta faces muito pouco visíveis

Fonte: Autoria nossa (fotos do protótipo rápido: Sílvio Uehara)

O quadro abaixo destaca a imagem ampliada do quadro anterior, e as diferenças observadas no protótipo rápido BX (Thing-O-Matic) comparado ao modelo CAD B (AutoCAD).

Quadro 23 - Diferenças na representação do protótipo rápido BX (Thing-O-Matic) comparado ao modelo CAD B (AutoCAD)



Fonte: Autoria nossa

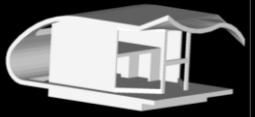
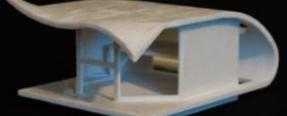
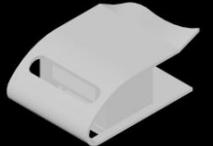
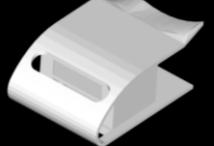
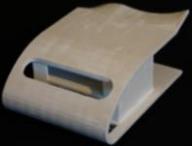
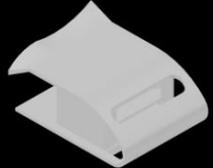
O protótipo rápido BX da impressora Thing-O-Matic, comparado com o modelo CAD B (AutoCAD), apresentou falha somente na construção de um elemento geométrico, conforme destacado na figura acima. Este problema de prototipagem rápida decorre provavelmente pelo limite de precisão do equipamento e de seu respectivo processo construtivo.

O grau de resolução da curva maior, da curva menor e da superfície complexa representadas de forma facetada, caso necessário, podem ser modificados e a resolução aumentada para uma maior quantidade de faces no modelo CAD B (AutoCAD). A cobertura em balanço, constituída pela superfície complexa, apresenta faces no formato triangular irregular e trapezoidal regular no

protótipo BX (Thing-O-Matic), pouco visível provavelmente por causa da representação em escala reduzida de 1:200.

A seguir, o Quadro 24 reúne todos os resultados obtidos em cada fase de elaboração do experimento, utilizando o modelo CAD B (AutoCAD) e a impressora tridimensional Zprinter (Z).

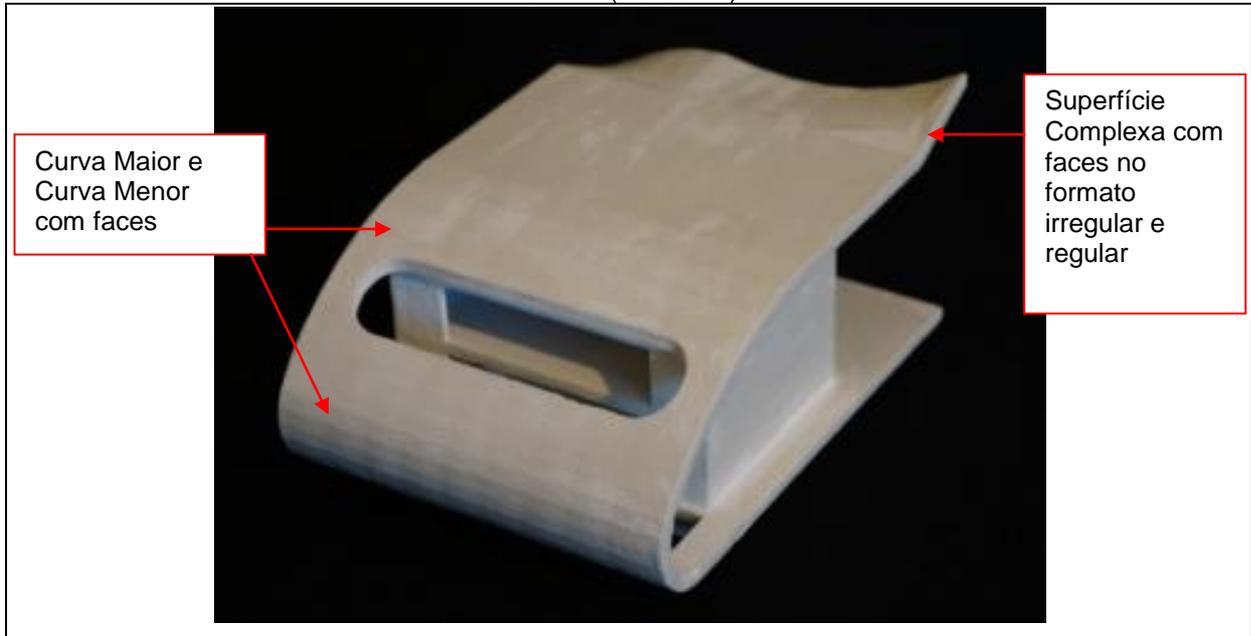
Quadro 24 - Comparação entre os resultados da Fase 1, Fase 2 e Fase 4 (Modelo BZ)

FASE 1 Imagem Modelo CAD B (AutoCAD)		FASE 2 Imagem Modelo BZ (Zprint)		FASE 4 Foto Protótipo BZ (Zprinter)	
					
					
					
					
QTD	TIPO DE GEOMETRIA Modelo CAD (L x P x H) m	QTD	INTEROPERABILIDADE entre os softwares	QTD	TIPO DE GEOMETRIA Protótipo (L x P x H) m
01	Base = 10,00x10,00x0,80	01	Base: Geom. importada integralmente	01	Base = 10,00x10,00x0,80
01	Piso Externo=12,00x16,00x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40	01	Piso Externo com Elem. Vazado: Geom. importada integralmente	01	Piso Externo=12,00x16,00x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40
04 02	Vigas Externas Frontais= 4,25x0,20x0,40 3,20x0,20x0,40	06	Vigas Externas Frontais: Geometrias importadas integralmente	04 02	Vigas Externas Frontais= 4,25x0,20x0,40 3,20x0,20x0,40
02	Pilares Externos= 0,40x0,20x5,20	02	Pilares Externos: Geometrias importadas integralmente	02	Pilares Externos= 0,40x0,20x5,20
02	Paredes Laterais= 0,20x7,00x5,60	04	Paredes Laterais: Geometrias importadas integralmente	02	Paredes Laterais= 0,20x7,00x5,60
02	Paredes Fundos= 0,20x1,70x4,80		Paredes Fundos: Geometrias importadas integralmente	02	Paredes Fundos= 0,20x1,70x4,80
01 01 01 04 02	Elementos internos: Não medidos Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos	09	Elementos internos: Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos Geometrias importadas Integralmente	01 01 01 04 02	Elementos internos: Não medidos Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos
01	Cobertura Curva Menor = 12,00x0,56x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura Curva Menor: Geometria importada integralmente Apresenta 8 faces	01	Cobertura Curva Menor = 12,00x0,56x0,40 Apresenta 8 faces
01	Cobertura Maior: Elemento Plano= 12,00x6,48x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40 Curva Maior= 12,00x6,96x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura Maior: Elemento plano Geometria importada integralmente Elemento Vazado Geometria importada integralmente Curva Maior Geometria importada integralmente Apresenta 7 faces	01	Cobertura Maior: Elemento Plano= 12,00x6,48x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40 Curva Maior= 12,00x6,96x0,40 Apresenta 7 faces
01	Cobertura em Balanço: Curva 1 = 6,90x3,00x0,40 Curva 2 = 5,10x3,00x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura em Balanço Geometria importada integralmente Apresenta faces no padrão irregular e regular	01	Cobertura em Balanço: Curva 1 = 6,90x3,00x0,40 Curva 2 = 5,10x3,00x0,40 Apresenta faces no padrão irregular e regular

Fonte: Autoria nossa (fotos do protótipo rápido: Sílvio Uehara)

O quadro abaixo destaca a imagem ampliada do quadro anterior, e as diferenças observadas no protótipo rápido BZ (Zprinter) comparado ao modelo CAD B (AutoCAD).

Quadro 25 - Diferenças na representação do protótipo rápido BZ (Zprinter) comparado ao modelo CAD B (AutoCAD)

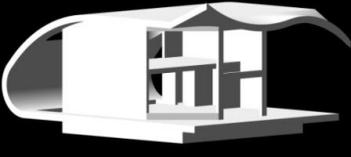
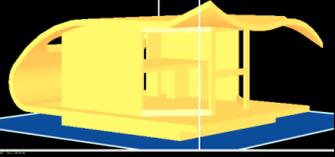
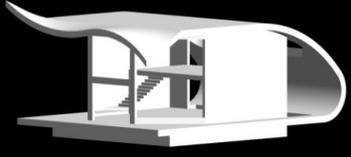
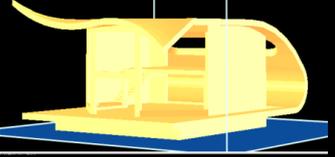
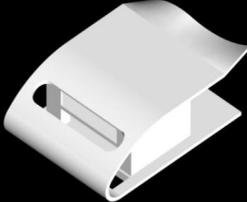
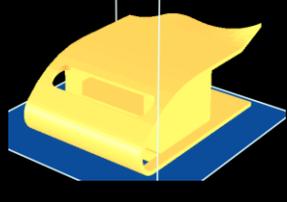
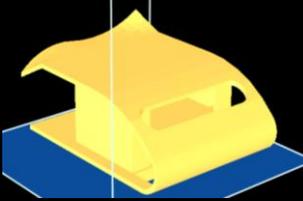


Fonte: Autoria nossa

As curvas e a superfície complexa do protótipo BZ (Zprinter) apresentam faces com tamanho e formas variadas em comparação com o modelo CAD B (AutoCAD). A representação das faces do protótipo BZ (Zprinter) é idêntica à representação da imagem do modelo CAD B (AutoCAD) importado no *software* Zprint da impressora tridimensional. A resolução destas geometrias pode ser alterada, para que as faces não sejam visivelmente representadas, e o número de divisão das superfícies curvas e complexas pode ser aumentado no *software* do modelo CAD B (AutoCAD).

A seguir, o Quadro 26 reúne todos os resultados obtidos em cada fase de elaboração do experimento utilizando o modelo CAD C (FormZ) e a impressora tridimensional Thing-O-Matic (X).

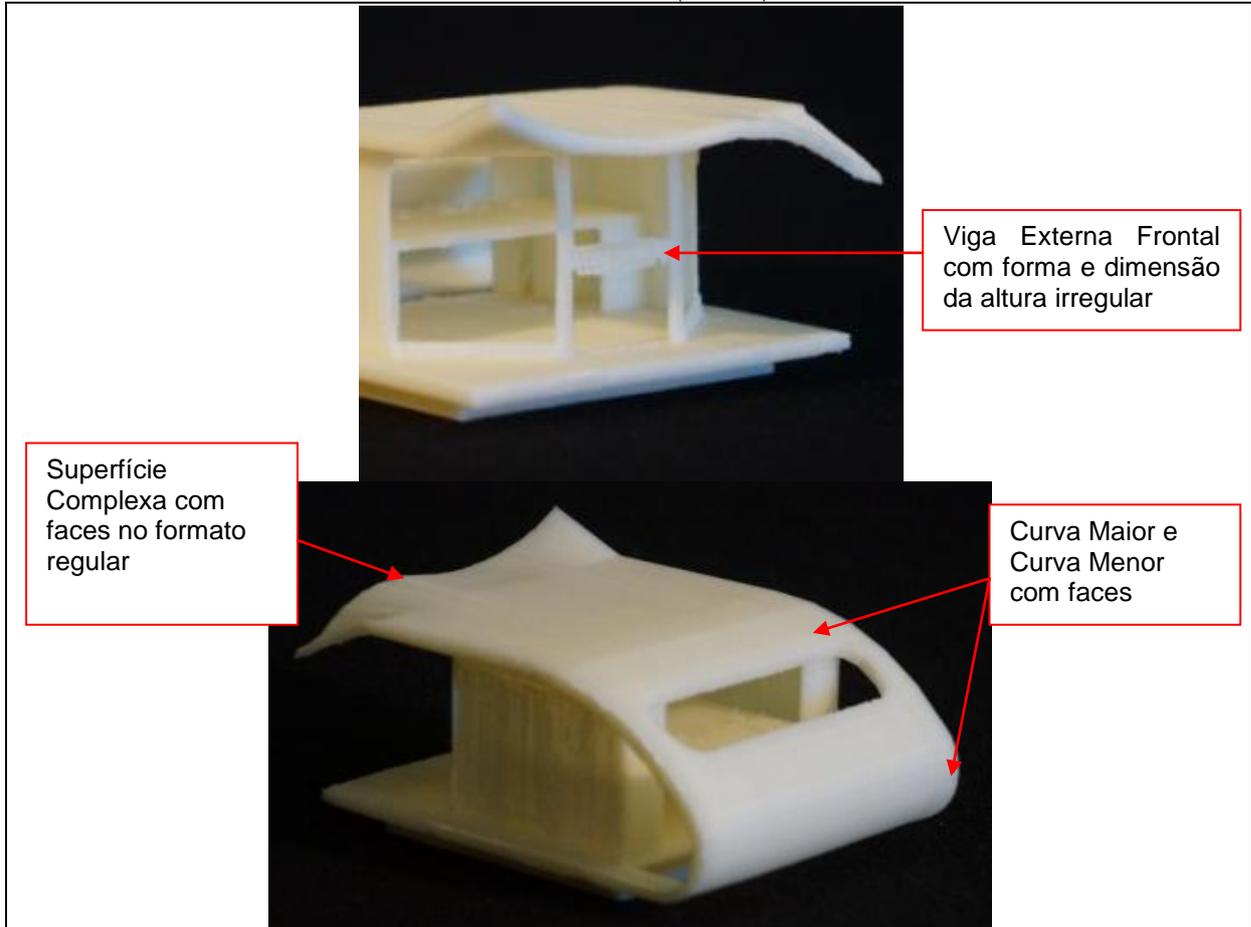
Quadro 26 - Comparação entre os resultados da Fase 1, Fase 2 e Fase 4 (Modelo CX)

FASE 1 Imagem Modelo CAD C (FormZ)		FASE 2 Imagem Modelo CX (ReplicatorG)		FASE 4 Foto Protótipo CX (Thing-O-Matic)	
					
					
					
					
QTD	TIPO DE GEOMETRIA Modelo CAD (L x P x H) m	QTD	INTEROPERABILIDADE entre os softwares	QTD	TIPO DE GEOMETRIA Protótipo (L x P x H) m
01	Base = 10,00x10,00x0,80	01	Base: Geom. importada integralmente	01	Base = 10,00x10,00x0,80
01	Piso Externo=12,00x16,00x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40	01	Piso Externo com Elem. Vazado: Geom. importada integralmente	01	Piso Externo = 12,00x16,00x0,40* *parte removida com o suporte Elem. Vazado = 10,00x2,00x0,40
04 02	Vigas Externas Frontais= 4,25x0,20x0,40 3,20x0,20x0,40	06	Vigas Externas Frontais: Geometrias importadas integralmente	04 01 01	Vigas Externas Frontais: 4,25x0,20x0,40 3,20x0,20x0,40 3,20x0,20-0,10x0,40-0,60* *forma e dimensão altura irregular
02	Pilares Externos= 0,40x0,20x5,20	02	Pilares Externos: Geometrias importadas integralmente	02	Pilares Externos: 0,40x0,20x5,20
02	Paredes Laterais= 0,20x7,00x5,60	04	Paredes Laterais: Geometrias importadas integralmente	02	Paredes Laterais: 0,20x7,00x5,60
02	Paredes Fundos= 0,20x1,70x4,80	02	Paredes Fundos: Geometrias importadas integralmente	02	Paredes Fundos: 0,20x1,70x4,80
01 01 01 04 02	Elementos internos: Não medidos Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos	09	Elementos internos: Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos Geometrias importadas Integralmente	01 01 01 04 02	Elementos internos: (Não medidos) Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos
01	Cobertura Curva Menor = 12,00x0,56x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura Curva Menor: Geometria importada integralmente Apresenta 12 faces	01	Cobertura Curva Menor = 12,00x0,56x0,40 Apresenta 12 faces
01	Cobertura Maior: Elemento Plano= 12,00x6,48x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40 Curva Maior= 12,00x6,96x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura Maior: Elemento plano Geometria importada integralmente Elemento Vazado Geometria importada integralmente Curva Maior Geometria importada integralmente Apresenta 5 faces	01	Cobertura Maior: Elemento Plano= 12,00x6,48x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40 Curva Maior= 12,00x6,96x0,40 Apresenta 5 faces
01	Cobertura em Balanço: Curva 1 = 6,90x3,00x0,40 Curva 2 = 5,10x3,00x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura em Balanço Geometria importada integralmente Apresenta faces no padrão regular	01	Cobertura em Balanço: Curva 1 = 6,90x3,00x0,40 Curva 2 = 5,10x3,00x0,40 Apresenta faces no padrão regular

Fonte: Autoria nossa (fotos do protótipo rápido: Sílvio Uehara)

O quadro abaixo destaca a imagem ampliada do quadro anterior, e as diferenças observadas no protótipo rápido CX (Thing-O-Matic) comparado ao modelo CAD C (FormZ).

Quadro 27 - Diferenças na representação do protótipo rápido CX (Thing-O-Matic) comparado ao modelo CAD C (FormZ)



Fonte: Autoria nossa

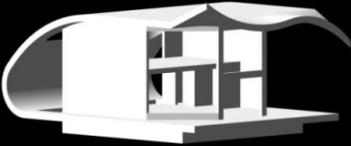
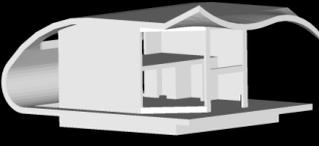
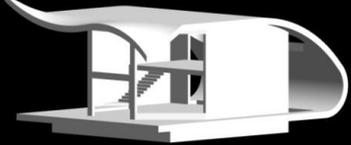
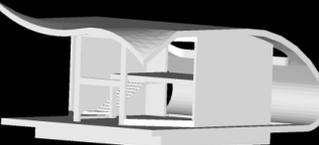
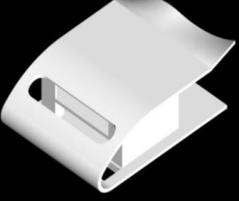
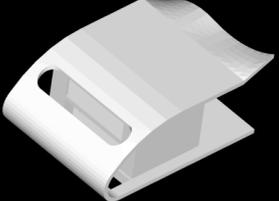
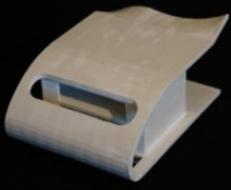
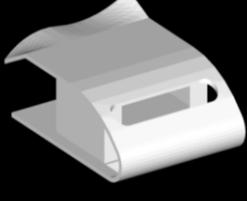
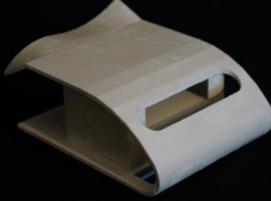
A mesma falha na representação da viga externa frontal pode ser observada em todos os três protótipos rápidos produzidos pela impressora Thing-O-Matic (AX, BX e CX). Este fato reforça a probabilidade do problema ser decorrente do limite de precisão do equipamento e do processo construtivo, no qual o modelo foi configurado em uma posição que utilizou como base para produção as dimensões mínimas de perfil da viga externa frontal.

A cobertura em balanço constituída pela superfície complexa apresenta faces no formato regular e uniforme, tanto na imagem do modelo CAD C (FormZ) importado, como no protótipo CX (Thing-O-Matic). Assim como ocorreu nos demais sistemas CAD, o grau de resolução da curva maior, da curva menor e da superfície

complexa representadas de forma facetada, também pode ser aumentado com a quantidade de faces no modelo CAD C (FormZ).

A seguir, o Quadro 28 reúne todos os resultados obtidos em cada fase de elaboração do experimento utilizando o modelo CAD C (FormZ) e a impressora tridimensional Zprinter (Z).

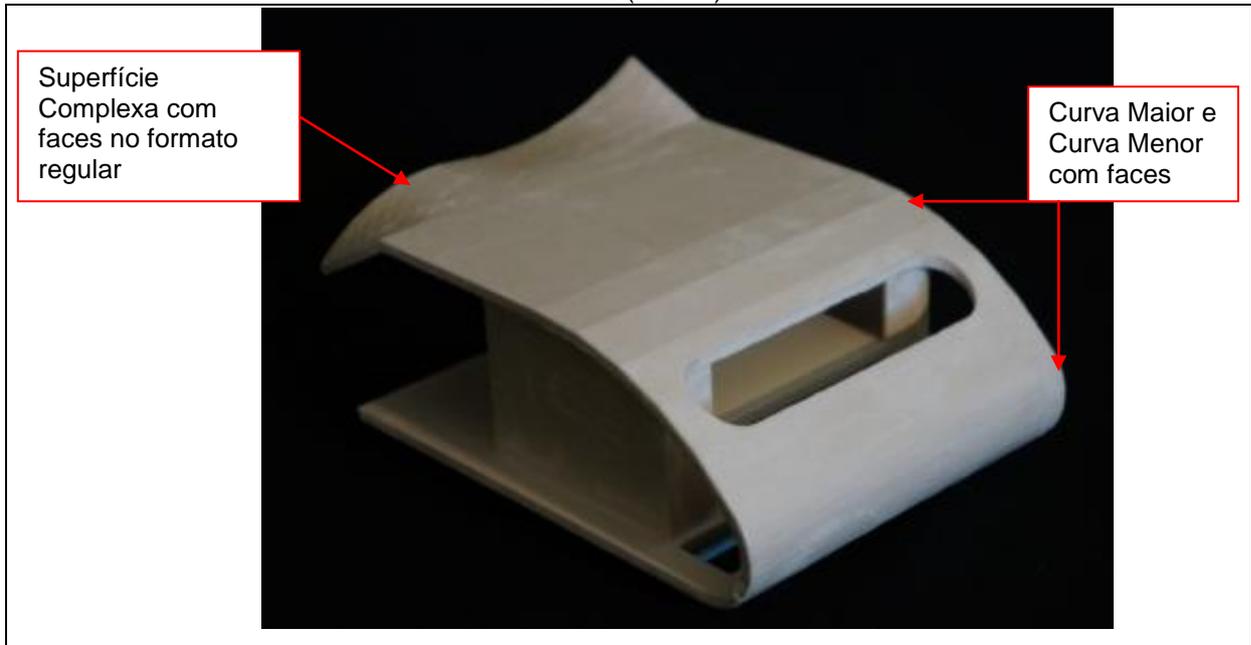
Quadro 28 - Comparação entre os resultados da Fase 1, Fase 2 e Fase 4 (Modelo CZ)

FASE 1 Imagem Modelo CAD C (FormZ)		FASE 2 Imagem Modelo CZ (Zprint)		FASE 4 Foto Protótipo CZ (Zprinter)	
					
					
					
					
QTD	TIPO DE GEOMETRIA Modelo CAD (L x P x H) m	QTD	INTEROPERABILIDADE ENTRE OS SOFTWARES	QTD	TIPO DE GEOMETRIA Protótipo (L x P x H) m
01	Base = 10,00x10,00x0,80	01	Base: Geom. importada integralmente	01	Base = 10,00x10,00x0,80
01	Piso Externo=12,00x16,00x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40	01	Piso Externo com Elem. Vazado: Geom. importada integralmente	01	Piso Externo=12,00x16,00x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40
04 02	Vigas Externas Frontais= 4,25x0,20x0,40 3,20x0,20x0,40	06	Vigas Externas Frontais: Geometrias importadas integralmente	04 02	Vigas Externas Frontais= 4,25x0,20x0,40 3,20x0,20x0,40
02	Pilares Externos= 0,40x0,20x5,20	02	Pilares Externos: Geometrias importadas integralmente	02	Pilares Externos= 0,40x0,20x5,20
02	Paredes Laterais= 0,20x7,00x5,60	04	Paredes Laterais: Geometrias importadas integralmente	02	Paredes Laterais= 0,20x7,00x5,60
02	Paredes Fundos= 0,20x1,70x4,80		Paredes Fundos: Geometrias importadas integralmente	02	Paredes Fundos= 0,20x1,70x4,80
01 01 01 04 02	Elementos internos: Não medidos Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos	09	Elementos internos: Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos Geometrias importadas Integralmente	01 01 01 04 02	Elementos internos: Não medidos Escada Pilar Laje Mezanino Paredes Internas Vigas Fundos
01	Cobertura Curva Menor = 12,00x0,56x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura Curva Menor: Geometria importada integralmente Apresenta 12 faces	01	Cobertura Curva Menor = 12,00x0,56x0,40 Apresenta 12 faces
01	Cobertura Maior: Elemento Plano= 12,00x6,48x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40 Curva Maior= 12,00x6,96x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura Maior: Elemento plano Geometria importada integralmente Elemento Vazado Geometria importada integralmente Curva Maior Geometria importada integralmente Apresenta 5 faces	01	Cobertura Maior: Elemento Plano= 12,00x6,48x0,40 Elemento Vazado= 10,00x2,00x0,40 Curva Maior= 12,00x6,96x0,40 Apresenta 5 faces
01	Cobertura em Balanço: Curva 1 = 6,90x3,00x0,40 Curva 2 = 5,10x3,00x0,40 Não apresenta faces planas	01	Cobertura em Balanço Geometria importada integralmente Apresenta faces no padrão regular	01	Cobertura em Balanço: Curva 1 = 6,90x3,00x0,40 Curva 2 = 5,10x3,00x0,40 Apresenta faces no padrão regular

Fonte: Autoria nossa (fotos do protótipo rápido: Sílvio Uehara)

O quadro abaixo destaca a imagem ampliada do quadro anterior, e as diferenças observadas no protótipo rápido CZ (Zprinter) comparado ao modelo CAD C (FormZ).

Quadro 29 - Diferenças na representação do protótipo rápido CZ (Zprinter) comparado ao modelo CAD C (FormZ)



Fonte: Autoria nossa

A representação do protótipo CZ (Zprinter) é idêntica à representação da imagem do modelo CAD C (FormZ), importado no *software* Zprint da impressora tridimensional, cuja superfície complexa apresenta faces no formato regular e as curvas também facetadas. O *software* do modelo CAD C (FormZ) permite que a configuração da resolução padrão (*default*) das geometrias curvas possa ser alterada, e o número de divisão das superfícies curvas e complexas pode ser aumentado, para que as faces não sejam visivelmente representadas.

Todas as imagens utilizadas nos quadros demonstrados anteriormente, que contém os resultados dos experimentos, estão ampliadas para obter uma melhor visualização das mesmas, e encontram-se disponíveis nos apêndices B, C e D.

O arquiteto deve considerar as medidas das cotas do desenho e não a escala informada no apêndice A, para modelar com precisão o mesmo projeto arquitetônico utilizado na realização dos experimentos desta Dissertação.

O último apêndice, denominado apêndice E, apresenta as imagens dos três modelos CAD A (Revit), B (AutoCAD) e C (FormZ) no formato padrão STL, quando

importados pelo sistema CAD C (FormZ). Nestas imagens observamos que o modelo importado apresenta muito mais formas facetadas e trianguladas, comparado ao protótipo rápido, sendo assim não recomendamos a verificação da integridade do modelo CAD para prototipagem utilizando este processo.

Nos próximos quadros, os dados dos experimentos são organizados de maneira a destacar as informações com diferenças na representação da geometria do modelo, e os diferentes tipos de geometrias agrupados.

As geometrias ortogonais simples (externas) compreendem a base, o piso, o elemento vazado do piso, a laje plana da cobertura, as vigas, os pilares, as paredes laterais e de fundos do modelo. As geometrias ortogonais simples (internas) consideram a escada, o pilar interno, a laje do mezanino e as paredes internas da copa e do banheiro. A curva simples maior faz parte da cobertura e possui um elemento vazado, enquanto que a curva simples menor é o elemento que une o piso com a cobertura do modelo. A superfície curva complexa é formada por dupla curvatura invertida, na cobertura em balanço.

A intenção é comparar as informações das geometrias de cada modelo CAD virtual original com as geometrias importadas no *software* da impressora tridimensional, e com o resultado obtido com a fabricação do modelo. Os critérios de comparação entre os aspectos da representação da geometria são a precisão em termos de resolução pelo número de faces, e a resolução por dimensionamento (largura x profundidade x altura), conferidos em escala.

A primeira coluna lista os tipos de geometrias que compõem o modelo CAD. A segunda coluna quantifica o número de elementos de cada tipo de geometria. A terceira representa a condição de importação de todas as geometrias do modelo CAD pelo *software* da impressora tridimensional, por meio de arquivo padrão STL gerado pelo modelo CAD, possibilitando definir outro modelo virtual com nome e padrão de arquivo da impressora tridimensional.

A quarta coluna contém dados sobre a precisão, em termos de resolução por números de faces, que representa o modelo virtual importado. A quinta coluna apresenta uma avaliação da precisão, em termos de resolução por números de faces, que representa o modelo prototipado. Por fim, a sexta coluna compara as dimensões dos elementos geométricos em relação ao projeto do modelo CAD original.

Quanto à interoperabilidade entre os sistemas, os resultados referentes à comparação entre os tipos de geometrias dos modelos são demonstrados em três níveis distintos: geometrias importadas integralmente, geometrias parcialmente importadas e geometrias não importadas.

Os resultados referentes ao grau de semelhança do aspecto formal, em termos de precisão entre o modelo virtual, modelo importado e modelo físico são categorizados como geometrias totalmente idênticas, geometrias parcialmente idênticas e geometrias não idênticas. Cada experimento apresenta seu próprio quadro para análise e comparação, a seguir:

Quadro 30 - Comparação entre o resumo dos resultados do experimento (Modelo AX)

MODELO CAD A Revit (RVT)	QUANTID. Geometrias (Unidades)	MODELO AX Revit>ReplicatorG (STL)	MODELO AX Revit>ReplicatorG PRECISÃO Nº Faces	PROTÓTIPO AX Revit>Thing-O-Matic PRECISÃO Nº Faces	PROTÓTIPO AX Revit>Thing-O-Matic PRECISÃO Dimensionamento
Geometrias Ortogonais Simples (Externas)	14	14 Geometrias do Modelo CAD A Importadas Integralmente para o ReplicatorG	14 Geometrias do Modelo AX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD A	14 Geometrias do Protótipo AX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD A	12 Geometrias do Protótipo AX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD A
					02 Geometrias do Protótipo AX Parcialmente Idênticas ao Modelo CAD A Variação Altura
Geometrias Ortogonais Simples (Internas)	09	09 Geometrias do Modelo CAD A Importadas Integralmente para o ReplicatorG	09 Geometrias do Modelo AX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD A	09 Geometrias do Protótipo AX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD A	07 Geometrias do Protótipo AX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD A
					02 Geometrias do Protótipo AX Não Idênticas ao Modelo CAD A Ausência Paredes
Curva Simples Menor (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD A Importada Integralmente para o ReplicatorG	Geometria do Modelo AX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD A 22 Faces	Geometria do Protótipo AX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD A	Geometria do Protótipo AX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD A
Curva Simples Maior (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD A Importada Integralmente para o ReplicatorG	Geometria do Modelo AX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD A 10 Faces	Geometria do Modelo AX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD A 10 Faces	Geometria do Protótipo AX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD A
Superfície Curva Complexa (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD A Importada Integralmente para o ReplicatorG	Geometria do Modelo AX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD A	Geometria do Protótipo AX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD A	Geometria do Protótipo AX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD A

Fonte: Autoria nossa

Quadro 31 - Comparação entre o resumo dos resultados do experimento (Modelo AZ)

MODELO CAD A Revit (RVT)	QUANTID. Geometrias (Unidades)	MODELO AZ Revit>Zprint (STL)	MODELO AZ Revit>Zprint PRECISÃO Nº Faces	PROTÓTIPO AZ Revit>Zprinter PRECISÃO Nº Faces	PROTÓTIPO AZ Revit>Zprinter PRECISÃO Dimensionamento
Geometrias Ortogonais Simples (Externas)	14	14 Geometrias do Modelo CAD A Importadas Integralmente para o Zprint	14 Geometrias do Modelo AZ Totalmente Idênticas ao Modelo CAD A	14 Geometrias do Protótipo AZ Totalmente Idênticas ao Modelo CAD A	14 Geometrias do Protótipo AZ Totalmente Idênticas ao Modelo CAD A
Geometrias Ortogonais Simples (Internas)	09	09 Geometrias do Modelo CAD A Importadas Integralmente para o Zprint	09 Geometrias do Modelo AZ Totalmente Idênticas ao Modelo CAD A	09 Geometrias do Protótipo AZ Totalmente Idênticas ao Modelo CAD A	09 Geometrias do Protótipo AZ Totalmente Idênticas ao Modelo CAD A
Curva Simples Maior (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD A Importada Integralmente para o Zprint	Geometria do Modelo AZ Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD A 10 Faces	Geometria do Modelo AX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD A 10 Faces	Geometria do Protótipo AZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD A
Curva Simples Menor (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD A Importada Integralmente para o Zprint	Geometria do Modelo AZ Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD A 28 Faces	Geometria do Protótipo AZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD A	Geometria do Protótipo AZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD A
Superfície Curva Complexa (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD A Importada Integralmente para o Zprint	Geometria do Modelo AZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD A	Geometria do Protótipo AZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD A	Geometria do Protótipo AZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD A

Fonte: Autoria nossa

Quadro 32 - Comparação entre o resumo dos resultados do experimento (Modelo BX)

MODELO CAD B AutoCAD (DWG)	QUANTID. Geometrias (Unidades)	MODELO BX AutoCAD>Replicator G (STL)	MODELO BX AutoCAD>Replicator G PRECISÃO Nº Faces	PROTÓTIPO BX AutoCAD>Thing-O- Matic PRECISÃO Nº Faces	PROTÓTIPO BX AutoCAD>Thing-O- Matic PRECISÃO Dimensionamento
Geometrias Ortogonais Simples (Externas)	14	14 Geometrias do Modelo CAD B Importadas Integralmente para o ReplicatorG	14 Geometrias do Modelo BX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD B	14 Geometrias do Protótipo BX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD B	13 Geometrias do Protótipo BX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD B 01 Geometria do Protótipo BX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD B Variação Altura
Geometrias Ortogonais Simples (Internas)	09	09 Geometrias do Modelo CAD B Importadas Integralmente para o ReplicatorG	09 Geometrias do Modelo BX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD B	09 Geometrias do Protótipo BX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD B	09 Geometrias do Protótipo BX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD B
Curva Simples Maior (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD B Importada Integralmente para o ReplicatorG	Geometria do Modelo BX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD B 07 Faces	Geometria do Modelo BX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD B 07 Faces	Geometria do Protótipo BX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD B
Curva Simples Menor (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD B Importada Integralmente para o ReplicatorG	Geometria do Modelo BX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD B 08 Faces	Geometria do Modelo BX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD B 08 Faces	Geometria do Protótipo BX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD B
Superfície Curva Complexa (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD B Importada Integralmente para o ReplicatorG	Geometria do Modelo BX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD B Facetada padrão irregular e regular	Geometria do Protótipo BX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD B Facetada padrão irregular e regular	Geometria do Protótipo BX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD B

Fonte: Autoria nossa

Quadro 33 - Comparação entre o resumo dos resultados do experimento (Modelo BZ)

MODELO CAD B AutoCAD (DWG)	QUANTID. Geometrias (Unidades)	MODELO BZ AutoCAD>Zprint (STL)	MODELO BZ AutoCAD>Zprint PRECISÃO Nº Faces	PROTÓTIPO BZ AutoCAD>Zprinter PRECISÃO Nº Faces	PROTÓTIPO BZ AutoCAD>Zprinter PRECISÃO Dimensionamento
Geometrias Ortogonais Simples (Externas)	14	14 Geometrias do Modelo CAD B Importadas Integralmente para o Zprint	14 Geometrias do Modelo BZ Totalmente Idênticas ao Modelo CAD B	14 Geometrias do Protótipo BZ Totalmente Idênticas ao Modelo CAD B	14 Geometrias do Protótipo BZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD B
Geometrias Ortogonais Simples (Internas)	09	09 Geometrias do Modelo CAD B Importadas Integralmente para o Zprint	09 Geometrias do Modelo BZ Totalmente Idênticas ao Modelo CAD B	09 Geometrias do Protótipo BZ Totalmente Idênticas ao Modelo CAD B	09 Geometrias do Protótipo BZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD B
Curva Simples Maior (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD B Importada Integralmente para o Zprint	Geometria do Modelo BZ Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD B 07 Faces	Geometria do Modelo BX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD B 07 Faces	Geometria do Protótipo BZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD B
Curva Simples Menor (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD B Importada Integralmente para o Zprint	Geometria do Modelo BZ Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD B 08 Faces	Geometria do Modelo BZ Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD B 08 Faces	Geometria do Protótipo BZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD B
Superfície Curva Complexa (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD B Importada Integralmente para o Zprint	Geometria do Modelo BZ Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD B Facetada padrão irregular e regular	Geometria do Protótipo BZ Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD B Facetada Padrão irregular e regular	Geometria do Protótipo BZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD B

Fonte: Autoria nossa

Quadro 34 - Comparação entre o resumo dos resultados do experimento (Modelo CX)

MODELO CAD C FormZ (FMZ)	QUANTID. Geometrias (Unidades)	MODELO CX FormZ>ReplicatorG (STL)	MODELO CX FormZ>ReplicatorG PRECISÃO Nº Faces	PROTÓTIPO CX FormZ>Thing-O-Matic PRECISÃO Nº Faces	PROTÓTIPO CX FormZ>Thing-O-Matic PRECISÃO Dimensionamento
Geometrias Ortogonais Simples (Externas)	14	14 Geometrias do Modelo CAD C Importadas Integralmente para o ReplicatorG	14 Geometrias do Modelo CX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD C	14 Geometrias do Protótipo CX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD C	13 Geometria do Protótipo CX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD C
					01 Geometria do Protótipo CX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD C Variação Altura
Geometrias Ortogonais Simples (Internas)	09	09 Geometrias do Modelo CAD C Importadas Integralmente para o ReplicatorG	09 Geometrias do Modelo CX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD C	09 Geometrias do Protótipo CX Totalmente Idênticas ao Modelo CAD C	09 Geometrias do Protótipo CX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD C
Curva Simples Maior (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD C Importada Integralmente para o ReplicatorG	Geometria do Modelo CX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD C 05 Faces	Geometria do Modelo CX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD C 05 Faces	Geometria do Protótipo CX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD C
Curva Simples Menor (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD C Importada Integralmente para o ReplicatorG	Geometria do Modelo CX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD C 12 Faces	Geometria do Modelo CX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD C 12 Faces	Geometria do Protótipo CX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD C
Superfície Curva Complexa (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD C Importada Integralmente para o ReplicatorG	Geometria do Modelo CX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD C Facetada padrão regular	Geometria do Protótipo CX Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD C Facetada padrão regular	Geometria do Protótipo CX Totalmente Idêntica ao Modelo CAD C

Fonte: Autoria nossa

Quadro 35 - Comparação entre o resumo dos resultados do experimento (Modelo CZ)

MODELO CAD C FormZ (FMZ)	QUANTID. Geometrias (Unidades)	MODELO CZ FormZ>Zprint (STL)	MODELO CZ FormZ>Zprint PRECISÃO Nº Faces	PROTÓTIPO CZ FormZ>Zprinter PRECISÃO Nº Faces	PROTÓTIPO CZ FormZ>Zprinter PRECISÃO Dimensionamento
Geometrias Ortogonais Simples (Externas)	14	14 Geometrias do Modelo CAD C Importadas Integralmente para o Zprint	14 Geometrias do Modelo CZ Totalmente Idênticas ao Modelo CAD C	14 Geometrias do Protótipo CZ Totalmente Idênticas ao Modelo CAD C	14 Geometrias do Protótipo CZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD C
Geometrias Ortogonais Simples (Internas)	09	09 Geometrias do Modelo CAD C Importadas Integralmente para o Zprint	09 Geometrias do Modelo CZ Totalmente Idênticas ao Modelo CAD C	09 Geometrias do Protótipo CZ Totalmente Idênticas ao Modelo CAD C	09 Geometrias do Protótipo CZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD C
Curva Simples Maior (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD C Importada Integralmente para o Zprint	Geometria do Modelo CZ Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD C 05 Faces	Geometria do Modelo CZ Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD C 05 Faces	Geometria do Protótipo CZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD C
Curva Simples Menor (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD C Importada Integralmente para o Zprint	Geometria do Modelo CZ Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD C 12 Faces	Geometria do Modelo CZ Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD C 12 Faces	Geometria do Protótipo CZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD C
Superfície Curva Complexa (Não Facetada)	01	Geometria do Modelo CAD C Importada Integralmente para o Zprint	Geometria do Modelo CZ Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD C Facetada padrão regular	Geometria do Protótipo CZ Parcialmente Idêntica ao Modelo CAD C Facetada padrão regular	Geometria do Protótipo CZ Totalmente Idêntica ao Modelo CAD C

Fonte: Autoria nossa

Todos os elementos geométricos dos modelos gerados nos três diferentes tipos de sistema CAD foram importados integralmente nos dois diferentes *softwares* do sistema de prototipagem rápida, durante a realização dos experimentos. Foi possível obter resultados bastante homogêneos e as pequenas diferenças foram identificadas basicamente na resolução das curvas e superfícies complexas.

Os resultados destes experimentos diferem da expectativa levantada na problemática descrita no início desta Dissertação, no primeiro Capítulo Introdução, onde foram apresentadas falhas na fabricação do protótipo. Inicialmente, isto nos fez crer na possível existência de variados problemas de interoperabilidade entre os sistemas utilizados, como por exemplo inversão de normais, rachaduras, erros de cavidades nas superfícies do modelo importado, entre outros. Estes mesmos problemas não ocorreram no momento da experimentação deste trabalho.

De forma a esclarecer os vários problemas ocorridos no exemplo citado anteriormente, uma entrevista informal foi realizada com a autora do modelo, Bianca

Ilha, seguindo como roteiro as recomendações sugeridas no final do décimo capítulo. Pode-se constatar que as questões a seguir levaram inevitavelmente aos problemas de falhas na construção do modelo físico digital:

- antes mesmo de ser exportado, o modelo CAD apresentava erros de formação de elementos geométricos e na fabricação - estes erros persistiram;
- o *software* escolhido para modelagem não possuía opção para exportação do modelo, no formato compatível com a impressora tridimensional. Houve necessidade de incluir outro *software* de modelagem para realizar esta tarefa; e
- o modelo virtual não foi pensado inicialmente para ser reproduzido como modelo físico, mas somente quando o mesmo já estava finalizado.

Constatamos, a partir da análise dos resultados obtidos por meio dos experimentos da presente pesquisa, que a modelagem digital é fase essencial no processo de prototipagem. O arquiteto deve entender e construir virtualmente cada elemento do seu projeto de maneira precisa, conforme a sua intenção, para garantir a qualidade do seu modelo.

Um mesmo projeto arquitetônico, modelado em diferentes sistemas CAD, pode apresentar diferentes graus de resolução, na representação de superfícies curvas e complexas, importadas e produzidas a partir de um mesmo sistema de prototipagem rápida.

Em todos os casos da experimentação, a resolução das superfícies curvas e complexas é reproduzida de maneira idêntica ao modelo virtual do arquivo formato STL, importado no *software* de prototipagem, e não como a imagem do modelo virtual original do sistema CAD.

O modelo gerado no sistema CAD específico - o modelo CAD A (Revit), e importado nos diferentes sistemas de prototipagem rápida, apresenta a resolução da superfície complexa de forma idêntica à do modelo virtual original. No momento da modelagem, Fase 1 (modelagem no sistema CAD), esta geometria não permitiu acessar as ferramentas para edição do grau de resolução das superfícies. Mas, no caso da superfície curva simples, os comandos de edição tornaram-se disponíveis.

Por outro lado, os modelos dos sistemas CAD genéricos utilizados no experimento, apesar de apresentarem o mesmo tamanho de arquivo STL, representam o tamanho e o formato das faces das superfícies curvas complexas, de

maneira diferente entre si, conforme as imagens dos modelos CAD importados no formato STL que constam no Apêndice E.

As curvas simples dos três modelos virtuais originais são representadas tanto nos modelos virtuais importados pelos *softwares* das impressoras tridimensionais, quanto nos protótipos com as faces, conforme resolução padrão (*default*) do sistema CAD.

Todos os elementos geométricos do modelo gerado nos três diferentes tipos de sistema CAD foram reproduzidos, na impressora tridimensional Zprinter, com a mesma dimensão em largura, profundidade e altura do modelo CAD original.

No caso da impressora tridimensional da MakerBot, mesmo com todos os elementos geométricos importados e modelados a partir dos três diferentes tipos de sistemas CAD, o protótipo apresentou irregularidades quanto ao aspecto de precisão, no dimensionamento e na representação de algumas formas simples ortogonais.

A maior quantidade de erros pode ser observada no modelo produzido na impressora tridimensional da Makerbot, a partir do sistema CAD específico, modelo CAD A (Revit), posto que não obteve sucesso na construção de duas paredes internas, e reproduziu com variação na forma e na dimensão da altura duas vigas frontais. No caso dos modelos gerados nos sistemas CAD genéricos, apenas uma das vigas frontais foi reproduzida com variação na forma e na dimensão da altura.

Deve-se observar que estes problemas de prototipagem rápida provavelmente são decorrentes da maneira como o arquivo padrão STL gerou as informações, associado ao limite de precisão do equipamento e de seu respectivo processo construtivo.

As informações a seguir são agrupadas com o intuito de avaliar a relação entre o tamanho dos formatos de arquivo, a resolução dos elementos geométricos e o tempo de fabricação gasto para cada um dos modelos CAD.

Os tipos de formatos de arquivos de modelo CAD e STL são quantificados em KB (Kilobyte) nas duas primeiras linhas. O número de faces, de todos os elementos de cada modelo, também foi registrado. As duas últimas linhas registram o tempo total estimado de fabricação, em cada tipo de impressora tridimensional utilizada no experimento (soma do tempo de fabricação com o tempo de espera, acrescido do tempo aproximado gasto para efetuar o acabamento do protótipo rápido), conforme demonstra o quadro a seguir:

Quadro 36 - Tamanho dos arquivos dos modelos CAD e STL e tempo total de fabricação

FORMATO	MODELO A (REVIT)	MODELO B (AUTOCAD)	MODELO C (FORMZ)
MODELO CAD	26.696 KB	318 KB	672 KB
ARQUIVO STL	1.560 KB	69 KB	69 KB
Nº FACES	6.340	1.402	1.398
TEMPO TOTAL FABRICAÇÃO Zprinter	8 Horas	7 Horas	7 Horas e 30 minutos
TEMPO TOTAL FABRICAÇÃO Thing-O-Matic	3 Horas e 30 minutos	3 Horas	3 Horas

Fonte: Autoria nossa

A variação do tamanho de arquivos formato CAD e STL do sistema CAD específico - muito maiores que os arquivos dos sistemas CAD genérico, não resultou no aumento de tempo na fabricação dos modelos físicos, pelo processo de adição de camadas. Constatou-se que a diferença de tempo resulta tão somente do trabalho manual, que consistiu em retirada do excesso de material, lixamento, e a resinagem no caso do protótipo da impressora Zprinter, na fase de acabamento.

O modelo CAD A (Revit) apresenta o arquivo e o número de faces com tamanho muito maior, comparado com os arquivos modelo CAD B (AutoCAD) e C (FormZ). Isto pode estar relacionado com a resolução maior da superfície complexa, o que possibilitou produzir esta geometria sem formas facetadas, de maneira idêntica ao modelo virtual original.

No caso do arquivo STL gerado a partir do modelo CAD A (Revit), também com tamanho muito maior, comparado com os outros dois arquivos no mesmo formato, este pode estar relacionado tanto com a resolução maior da superfície complexa quanto ao fato deste arquivo não ser nativo do *software* Revit.

10 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos por meio dos experimentos desenvolvidos nesta Dissertação sugerem que a hipótese é promissora, uma vez que afirma que o uso de diferentes tipos de sistemas CAD e de prototipagem rápida resulta em diferentes níveis de sucesso, na transferência de informações entre os mesmos. Apesar do variado grau de precisão, verificou-se que tais sistemas podem representar de forma satisfatória os modelos físicos digitais, em relação aos modelos virtuais originais, portanto sem necessidade de retrabalho.

A interoperabilidade, ou seja, a transferência das informações de um dado sistema CAD para outro de prototipagem rápida, ocorreu com sucesso quanto à integralidade de todos os elementos geométricos que formam o modelo original, considerando a utilização do formato padrão STL nas atividades de exportação e importação.

Se por um lado a interoperabilidade entre os sistemas utilizados neste experimento ocorreu integralmente, por outro a questão de precisão pode ser avaliada de maneira distinta. O protótipo resultante não foi exatamente igual para todos os sistemas utilizados, devido aos diferentes níveis de resolução dos arquivos STL gerados para a transferência de dados, e devido às limitações em termos de precisão dos sistemas de prototipagem.

Em termos de precisão na representação dos modelos, a resolução das superfícies curvas e complexas ocorreu de forma diferenciada em cada tipo de sistema CAD utilizado. O sistema CAD específico gerou o arquivo STL com número de faces muito maior do que os arquivos gerados pelos sistemas CAD genéricos, conseqüentemente reproduziu a superfície curva complexa com maior resolução e igualdade, em relação ao modelo CAD original.

No caso dos sistemas CAD genéricos, estes produziram arquivos STL com tamanhos e número de faces muito similares entre si. Mesmo assim, a resolução ocorreu de forma diferenciada quanto à representação do formato e tamanho das faces das superfícies complexas, baseada no padrão do arquivo STL exportado.

Os diferentes sistemas CAD necessitam de uma resolução maior do que a usualmente padrão, para representar da mesma forma o modelo importado nos sistemas de prototipagem rápida. O grau de precisão em termos de resolução das

superfícies curvas e complexas depende da definição maior ou menor desses mesmos parâmetros, dentro do sistema CAD, que podem variar conforme o interesse do usuário no momento da modelagem.

Os dois sistemas de prototipagem rápida reproduzem de maneira idêntica a representação do modelo CAD importado, sendo assim o usuário não necessita produzir o modelo físico para verificar se a resolução das superfícies curvas e complexas atende a sua intenção de projeto.

Conforme a intenção de produzir as superfícies curvas sem o aspecto facetado, as informações obtidas nos experimentos sugerem que no momento da modelagem a resolução dos elementos geométricos das superfícies curvas seja aumentada ao máximo possível. O arquivo STL gerado não aumenta o tempo de fabricação do modelo prototipado, considerando o processo por adição de camadas.

Se a intenção da representação for tirar partido da resolução facetada das superfícies curvas, sugere-se manter a resolução baixa desses elementos geométricos ou ainda mantê-los na resolução padrão (*default*) do sistema CAD.

A reprodução idêntica dos modelos CAD original, em modelos prototipados, não depende somente da interoperabilidade entre os sistemas. Nos diferentes sistemas CAD, além da configuração de resolução das superfícies curvas e complexas, depende também das características dos equipamentos de prototipagem, como a resolução de camadas, resistência do material e escala empregada.

Sintetizando, por um lado os sistemas CAD definem a precisão em termos de resolução das faces do modelo, observada principalmente nas curvas e superfícies complexas. Por outro lado, os sistemas de prototipagem rápida são responsáveis pela precisão em termos de dimensionamento dos elementos geométricos. Em outras palavras, a obtenção de um protótipo rápido idêntico ao modelo virtual original depende tanto da resolução definida inicialmente no sistema CAD quanto do grau de precisão oferecido pelo equipamento de prototipagem rápida.

Os resultados obtidos sugerem que a modelagem em diferentes sistemas CAD e de prototipagem rápida, desde o início do processo de projeção, pode ser considerada um recurso confiável, pelo fato de oferecer ferramentas capazes de representar de maneira rápida e fidedigna a intenção formal do arquiteto.

As especificações definidas em cada fase dos experimentos realizados podem auxiliar o arquiteto a produzir modelos físicos digitais, a partir de modelos CAD, com menor quantidade de retrabalho. Portanto elaboramos as seguintes recomendações, divididas em dois quadros apresentados a seguir: o primeiro com as recomendações gerais que devem ser seguidas antes do início do processo de projeto e, o segundo, com as recomendações específicas, que reúnem as descrições de cada item de todo o processo de modelagem e prototipagem rápida.

Quadro 37 - Recomendações gerais para modelagem em CAD e prototipagem rápida por adição

RECOMENDAÇÕES GERAIS	ITENS	DESCRIÇÃO
Escolha do Sistema CAD	• Geometrias Complexas	O <i>software</i> escolhido de sistema CAD deve oferecer ferramentas para modelagem de geometrias complexas, de maneira a não limitar a proposta de projeto.
	• Parametrização	Deve disponibilizar ferramentas de parametrização de elementos geométricos, pois reduzem o tempo de remodelagem manual.
	• Arquivo STL ou padrão 3DP	Deve disponibilizar o comando ou <i>plug in</i> para exportação no formato padrão STL ou compatível com impressora tridimensional escolhida.
Escolha do Sistema de Prototipagem Rápida	• Arquivo STL ou padrão CAD	O <i>software</i> de prototipagem rápida deve oferecer o comando para importação no formato padrão STL ou compatível com o <i>software</i> CAD escolhido
	• Especificações do Equipamento	Verificar o tamanho máximo em comprimento, largura e altura da base de construção do protótipo e o limite de espessura, para calcular a relação entre a escala e o menor tamanho permitido para modelar um elemento geométrico.
	• Protótipo Inteiro ou por Montagem	Prever a produção do protótipo por inteiro ou em partes separadas, o que requer cuidados específicos no encaixe e montagem (assunto não abordado neste trabalho).
Divisão de Todo o Processo em Fases	<ul style="list-style-type: none"> • Fase 1 (modelagem no sistema CAD) • Fase 2 (Planejamento) • Fase 3 (Fabricação no sistema de prototipagem rápida) • Fase 4 (Acabamento) 	Dividir e organizar o processo de prototipagem desde a modelagem para possibilitar a economia de tempo e custos.

Fonte: Autoria nossa

Quadro 38 - Recomendações específicas para modelagem em CAD e prototipagem rápida por adição

RECOMENDAÇÕES ESPECÍFICAS	ITENS	DESCRIÇÃO
Fase 1 (modelagem no sistema CAD)	• Elementos Fechados ou Unidos	Construir o modelo virtual com elementos geométricos fechados ou unidos.
	• Quadrante + x, y, z	Construir o modelo virtual nos quadrantes positivos em x, y, z, do ambiente gráfico.
	• Resolução da Geometria Curva ou Complexa	Aumentar a resolução da geometria curva ou complexa, conforme a intenção de representação do modelo físico.
	• Elementos Transparentes	Optar em não representar os elementos transparentes no protótipo; caso haja intenção do protótipo todo fechado, verificar necessidade de orifício para retirada do material interno (pó).
	• Exportar STL ou padrão 3DP	Exportar o arquivo no formato STL ou compatível entre os sistemas CAD/CAM escolhidos.
Fase 2 (Planejamento)	• Importar STL ou padrão 3DP	Importar o arquivo no formato STL ou compatível entre os sistemas CAD/CAM escolhidos.
	• Interoperabilidade	Verificar se todos os elementos que formam o modelo são representados dentro do <i>software</i> da impressora tridimensional.
	• Inversão de Normais	Caso algum ou vários elementos da geometria do modelo não sejam representados, utilizar o comando para inversão de normais do sistema de prototipagem.
	• Resolução	Conferir o grau de resolução das curvas e superfícies complexas, que devem ser representadas conforme intenção proposta.
	• Correção do Modelo Virtual	Retornar à Fase 1 (modelagem no sistema CAD) para efetuar a correção da geometria e resolução do modelo.
	• Modelo Correto	O modelo deve ser representado corretamente, para poder ser configurado para prototipagem.
	• Escala	Definir a escala do modelo, conforme a unidade de desenho definida no sistema CAD.
	• Suporte	Verificar a necessidade de suporte para construção estável do protótipo.
	• Rotação e Origem	Verificar a melhor posição, rotação, ponto de origem e os afastamentos conforme necessidade no momento de retirada do protótipo do equipamento.
• Estimativa do Tempo de Fabricação	Verificar o tempo estimado para fabricação, geralmente disponibilizado pelo comando <i>print preview</i> do sistema de prototipagem rápida.	
Fase 3 (Fabricação no sistema de prototipagem rápida)	• Manual de Instruções	Seguir o manual de instrução do equipamento escolhido para produzir o protótipo rápido.
Fase 4 (Acabamento)	• Acabamento	Efetuar o acabamento do protótipo conforme recomendações do fabricante.
	• Tempo Total de Fabricação	Considerar o somatório do tempo de fabricação, com o tempo de pós-fabricação e a estimativa do tempo para acabamento final do protótipo.

Fonte: Autoria nossa

10.1 Desdobramentos Futuros

A proposta para a continuidade deste estudo sugere a utilização dos sistemas CAD/CAM para o desenvolvimento e finalização do mesmo projeto arquitetônico, definido inicialmente no experimento desta Dissertação. Outras condicionantes poderiam ser consideradas, como a análise de desempenhos estruturais e energético, para o desenvolvimento das próximas etapas de desenvolvimento do projeto, utilizando-se *softwares* específicos. Até chegar à etapa final, poderiam ser incorporados outros sistemas de fabricação digital para a produção e montagem do protótipo do projeto, com maior grau de detalhamento e em escala tamanho real de pré-produção.

As ferramentas digitais poderiam ser estudadas para serem aplicadas, ainda no contexto de processo de projeto arquitetônico, de maneira integrada com as demais áreas especializadas da própria arquitetura e das engenharias, com o intuito de otimizar a qualidade do projeto e de sua execução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3DSYSTEMS. **Printers**. Disponível em: <<http://production3dprinters.com/spro-60-sd-sls-production-printer>> Acesso em: 25 out. 2011.

3T RPD. **Building Success Layer by Layer**. Disponível em: <<http://www.3trpd.co.uk/casestudies/zaha-hadid-architects-ltd.htm>>. Acesso em: 04 jul. 2011.

ANDRADE, Max L. V. X de.; RUSCHEL, Regina Coeli. Building Information Modeling (BIM). In: _____. **O Processo de Projeto em Arquitetura da Teoria à Tecnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

_____; MOREIRA, Daniel de Carvalho. O processo e os métodos. In: KOWALTOWSKI, Doris C. C. K.; MOREIRA, Daniel de Carvalho; PETRECHE, João R. D., FABRÍCIO, Márcio M. (Org.). **O Processo de Projeto em Arquitetura da Teoria à Tecnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

ARCHIPLANET. **Bauhaus**. Disponível em: <<http://www.archiplanet.org/buildings/Bauhaus.html>>. Acesso em: 15 ago. 2011

ARPIADESIGN. **Estereolitografia - SLA**. Disponível em: <<http://www.arpiadesign.com.br/servicos/EstereolitografiaSLA.html>> Acesso em: 25 out. 2011.

AUTODESK. **AutoCAD**. Disponível em: <<http://www.autodesk.com.br/adsk/servlet/pc/index?id=14609014&siteID=1003425>>. Acesso em: 06 ago. 2012a.

_____. **Autodesk Revit**. Disponível em: <<http://www.autodesk.com.br/adsk/servlet/pc/index?siteID=1003425&id=18840884>>. Acesso em: 06 ago. 2012b.

BOZDOC, Marian. **History of CAD. 2003**. Disponível em: <<http://www.mbdesign.net/mbinfo/CAD-Intro.htm>>. Acesso em: 25 maio 2012.

BRASIL. **e-PING**: Programa de Governo Eletrônico Brasileiro. Disponível em: <<http://www.governoeletronico.gov.br/acoes-e-projetos/e-ping-padroes-de-interoperabilidade>>. Acesso em: 26 mar. 2012.

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.

CEFRIQ. **Improving Efficiency and Productivity in the Construction Sector Through the Use of Information Technologies, 2011**. Disponível em: <http://www.cefrio.qc.ca/fileadmin/documents/Rapports/Improving_efficiency_and_productivity_in_the_construction_sector_final.pdf>. Acesso em: 17 maio 2012.

CELANI, Gabriela. **CAD Criativo**. Rio de Janeiro: Campus, 2003.

_____; BERTHO, Beatriz C. **A Prototipagem Rápida no Processo de Produção de Maquetes de Arquitetura**. Graphica. Curitiba, Brasil. 2007. Disponível em: <http://www.degraf.ufpr.br/artigos_graphica/APROTOTIPAGEM.pdf>. Acesso em: 12 set. 2011.

CIMJECT. **Laboratório de Projeto e Fabricação de Componentes de Plástico Injetados**. Disponível em: <http://www.cimject.ufsc.br/knowledge/01_knowledge_RP.htm>. Acesso em: 02 de jun 2012.

CRESPO, C. C.; RUSCHEL, R. C. **Ferramentas BIM: um desafio para a melhoria no ciclo de vida do Projeto**. III Encontro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção Civil. Porto Alegre, RS. 2007. Disponível em: <<http://www6.ufrgs.br/norie/tic2007/artigos/A1085.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2011.

CUNHA, Edgard L., GONÇALVES, José R., SOUZA, José R. A., SILVA, Sílvio P. (Editores): **Corte e Conformação de Metais**. São Paulo: Aranda, número 44, 2008.

DARCY. **Revista de Jornalismo Científico e Cultural da Universidade de Brasília**. Nº 05, Novembro, Dezembro, 2010. Disponível em: <<http://www.arcoweb.com.br/arquitetura/joao-filgueiras-lima-centro-cultural-20-07-2011.html>>. Acesso em: 21 set. 2011.

De MASI, Domenico. **O Ócio Criativo**. Entrevista a Maria Serena Palieri. Rio de Janeiro: Sextante, 2000.

EASTMAN, Chuck. **What is BIM?** BIM Resources – Georgia Tech, Georgia, 2007. Disponível em: <http://bim.arch.gatech.edu/content_view.asp?id=402>. Acesso em: 28 Jun. 2011.

Êxodo. Português. In: **Bíblia Sagrada**. Tradução de João Ferreira de Almeida. Barueri, SP: Sociedade Bíblica do Brasil, 2008. Edição Revista e Atualizada no Brasil. 2. ed. 1664p.

_____; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

FLÓRIO, Wilson. **O uso de ferramentas de modelagem vetorial na concepção de arquitetura de formas complexas**. 2005. 477p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo – FAU/USP.

_____; ARAÚJO, Nieri Soares de; SEGALL, Mario Lasar. **Protótipos Rápidos de coberturas complexas em arquitetura: comparação entre os processos FDM e 3D printer**. SIGraDi, Cuba, 2008.

FORMZ. **3D Form Syntethizer User's Manual**. Disponível em: <http://lecomp.fau.unb.br/moodle/pluginfile.php/142/mod_resource/content/1/manual_s_do_formz/formZ%20Users%20Manual.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2012.

FRANCISCO, Herland Miguel. **Estudo das Propriedades Mecânicas das Estruturas Estereolitográficas**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro. Departamento de Engenharia Mecânica. 2010, (112 p.).

GOOGLE. **Maps**. Disponível em: <<http://g.co/maps/99kpb>>. Acesso em: 06 maio 2012.

HADID, Zaha. **Zaha Hadid Architects**. Disponível em: <<http://www.zaha-hadid.com/archive>>. Acesso em: 08 jun. 2011a.

_____. **Zaha Hadid Architects**. Disponível em: <<http://www.zaha-hadid.com/architecture/guggenheim-museum/>>. Acesso em: 08 jun. 2011b.

_____. **Hoenheim-Nord Terminus and Car Park**. Disponível em: <<http://www.zaha-hadid.com/architecture/hoenheim-nord-terminus-and-car-park/>>. Acesso em: 15 abr. 2012c.

_____. **Complete Works**. Rizzoli. New York. 2012.

_____. Disponível em: <<http://www.revistaau.com.br/arquitetura-urbanismo/218/entrevista-com-zaha-hadid-258242-1.asp>>. Acesso em: maio 2012a.

_____. Disponível em: <<http://www.zaha-hadid.com/people/zaha-hadid/>>. Acesso em: 02 jun. 2012b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9699**.

Disponível em:

<http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_ics/catalogue_ics_browse.htm?ICS1=91&ICS2=40&ICS3=1&published=on>. Acesso em: 01 abr. 2012.

ITI TranscenData. **Interoperability Solutions for CAD/CAM/CAE/PLM**. Disponível em: <<http://www.transcendata.com/products/cadiq/index.htm>>. Acesso em: 16 maio 2012.

IWAMOTO, Lisa. **Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques**. New York: Princeton Architectural Press, 2009.

JACOSKI, C. A. **Integração e interoperabilidade em projetos de edificações: uma implementação com IFC/XML**. Florianópolis, 2003. 218p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina.

JUSTI, Alexander Rodrigues. **Revit Architecture 2010**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2010.

_____; LAMBERTS, R. **A Interoperabilidade como Fator de Integração de Projetos na Construção Civil**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Disponível em: <<http://www.eesc.usp.br/sap/projetar/files/A009.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2012.

Kieran, Stephan; Timberlake, James. **Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies Are Poised to transform Building Construction**. The MacGraw-Hill Companies, 2004, USA.

KOLAREVIC, Branko. **Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age**. ACADIA, pp. 268-276, 2001.

_____. **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing**. New York: Taylor & Francis, 2003.

_____; Kvan, Thomas. **Rapid prototyping and its application in architectural design**. Elsevier: Automation in Construction 11 (2002) pp.277-278.

KOSTOF, Spiro. **The Architect: Chapters in the History of the Profession**. EUA: University of California Press, 1977.

KOUTAMANIS, Alexander. **A Biased History of CAAD: The bibliographic version**. Session 13: generative systems eCAADe 23, pp. 629-637, 2005. Disponível em: <<http://www.re-h.nl>; <http://caad.bk.tudelft.nl>>. Acesso em: 14 nov. 2011

KUNZE, A. A. C. (2009). **Interoperabilização de sistemas de informação: uma estratégia de coleta mínima de dados secundários para estudos de transportes**. Dissertação de Mestrado, Publicação T.DM-005A/2009, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 193p.

LAWSON, Bryan. **Como arquitetos e designers pensam**. Tradução de Maria Beatriz Medina. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

_____. **How designers think: The design process demystified**. 4. ed. Oxford: Elsevier/Architectural, 2005.

MAKERBOT. **Thing-O-Matic 3D printer**. Disponível em: <<http://www.makerbot.com/>>. Acesso em: 19 nov. 2011.

MARK, Earl; GROSS, Mark; GOLDSCHMIDT, Gabriela. **A Perspective on Computer Aided Design After Four Decades**. eCAADe 26 - Section 04:CAAD Curriculum 1. p.169-176. 2008. Disponível em: <http://code.arc.cmu.edu/archive/upload/ecaade2008_069.content.0.pdf>. Acesso em: 26 mai 2012.

MATIAS, João Manuel. **Simulação e Optimização de Processos Estereolitográficos**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro. Departamento de Engenharia Mecânica. 2007, (141 p.). Disponível em: <<http://ria.ua.pt/bitstream/10773/2428/1/2008001138.pdf>>. Acesso em: 02 jun 2012.

McKENNEY, Dan. **Model Quality: The Key to CAD/CAM/CAE Interoperability**. International TechneGroup Incorporated. Milford, Ohio, 1998. Disponível em: <<http://www.mssoftware.com/support/library/conf/amuc98/p02398.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2012.

MILLS, Criss B. **Projetando com Maquetes: Um guia de como fazer e usar maquetes de projeto de Arquitetura**. Porto Alegre: Bookman, 2. ed., 2007.

MITCHELL, William J.; MCCULLOUGH, Malcolm. **Digital Design Media**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1995.

MOREIRA, Daniel de Carvalho; KOWALTOWSKI, Doris C. C. K. O programa arquitetônico. In: KOWALTOWSKI, Doris C. C. K.; MOREIRA, Daniel de Carvalho; PETRECHE, João R. D., FABRÍCIO, Márcio M. (Org.). **O Processo de Projeto em Arquitetura da Teoria à Tecnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

MOSTAFAVI, Mohsen. **El Paisaje como Planta: una conversación con Zaha Hadid**. In revista El Croquis no. 103, 2001. *Arquitectura Viva*, n. 55, 1997.

NARDELLI, Eduardo S.; VICENT, Charles de Castro. Pesquisa revela como escritórios de arquitetura utilizam *softwares*. Pini. **Revista AU**, n. 188, 2009. Disponível em: <<http://www.revistaau.com.br/arquitetura-urbanismo/188/artigo155941-1.asp>>. Acesso em: 09 set. 2011.

NARDELLI, Eduardo S. Arquitetura e Projeto na Era Digital. **Arquiteturarevista**, v. 3, nº 1, (2007):28-36. Disponível em: <http://www.arquiteturarevista.unisinos.br/pdf/ART03_Nardelli.pdf>. Acesso em: 09 abr. 2012.

OLIVEIRA, Marina Rodrigues de; FABRÍCIO, Márcio M. Projeto paramétrico e prototipagem rápida: casos em instituições internacionais. In: KOWALTOWSKI, Doris C. C. K.; MOREIRA, Daniel de Carvalho; PETRECHE, João R. D., FABRÍCIO, Márcio M. (Org.). **O Processo de Projeto em Arquitetura da Teoria à Tecnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

ORCIUOLI, Afonso; CELANI, Gabriela. Interseção – 3D em Detalhes. Pini. **Revista AU**, Ano 25, nº 201, Dezembro 2010, p. 68-71.

OXMAN, Rivka. **Theory and design in the first digital age**. *Design Studies*, 27(2006):229-265.

PÉREZ-GOMEZ, Alberto e PELLETIER, Louise. Architectural Representation beyond Perspectivism. **Perspecta**, Vol. 27, (1992), pp. 21-39.

PHAIDON. **The Phaidon Atlas of Contemporary World Architecture**. Phaidon, 2004.

PINA, Sílvia A. M. G.; FILHO, Francisco Borges; MARANGONI, Renata França. Maquetes e modelos como estímulo à criatividade no projeto arquitetônico. In: KOWALTOWSKI, Doris C. C. K.; MOREIRA, Daniel de Carvalho; PETRECHE, João R. D., FABRÍCIO, Márcio M. (Org.). **O Processo de Projeto em Arquitetura da Teoria à Tecnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

PUPO, Regiane T. **Ensino da Prototipagem Rápida e fabricação digital para arquitetura e construção no Brasil**. 2008. Disponível em:

<<http://www.fec.unicamp.br/~parc/vol1/n3/vol1-n3-pupo.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2011.

PUPO, Regiane; CELANI, Maria Gabriela C. Prototipagem rápida e fabricação digital na Arquitetura: fundamentação e formação. In: KOWALTOWSKI, Doris C. C. K.; MOREIRA, Daniel de Carvalho; PETRECHE, João R. D., FABRÍCIO, Márcio M. (Org.). **O Processo de Projeto em Arquitetura da Teoria à Tecnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

REPRAP. **Free desktop 3D printer**. Disponível em: <www.reprap.org/wiki/main_page>. Acesso em: 25 out. 2011.

RIBEIRO, Orlando P. **Zaha Hadid - A Paisagem como Planta: Topologia, Acessibilidade e Linhas de Movimento**. Da Vinci, Curitiba, V. 3, N. 1, P. 57-70, 2006.

RYPL, Daniel; BITTAR, Zdenek. **Triangulation of 3D Surfaces Described by Stereolithography Files**. Prague, Czech Republic, 2005. Disponível em: <<http://mech.fsv.cvut.cz/~dr/papers/Lisbon04/node2.html>>. Acesso em: 28 maio 2012.
ROBBINS, Edward. **Why architects draw**. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1997.

ROSA, Darlan. **Memorial JK**. Disponível em: <<http://www.darlanrosa.com/portu/jk.htm>> Acesso em: 21 set. 2011.

RYDER, Gerard; ION, Bill; GREEN, Graham; HARRISON, David; WOOD, Bruce. **Rapid design and manufacture tools in architecture**. Elsevier: Automation in Construction 11 (2002) pp. 279-290.

SCHODEK, D.; BECHTHOLD, M.; GRIGGS, K.; KAO, K. M.; STEINBERG, M. **Digital Design and Manufacturing: CAD/CAM Applications in Architecture and Design**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

SCHUMACHER, Patrik. **Digital Hadid: Landscape in Motion**. Suíça: Birkhauser, 2004.

SILVA, Neander F.; LIMA, Ecilamar M. **O Uso Simultâneo de Modelos Reduzidos e Virtuais no Início do Ensino de Projeto de Arquitetura**. Paranoá (UNB), vol 10, 2008.

SIMONDETTI, Alvise. **Computer-Generated Physical Modeling In The Early Stages Of The Design Process**. Elsevier: Automation in Construction 11 (2002) pp. 303-311.

SISGRAPH. **CAD Interfaces**. Disponível em: <<http://www.sisgraph.com.br/press/release/2008/0003.asp>> Acesso em: 25 out. 2011.

STACEY, Michael; BEESLEY, Philip & HUI, Vincent. **Digital Fabricators**. Toronto: University of Waterloo School of Architecture Press, 2004.

STRATASYS. **3D Printers**. Disponível em:
<<http://www.stratasys.com/Products/3D-Printers.aspx>> Acesso em: 25 out. 2011.

TURBOCAD. **3D Printers**. Disponível em:
<<http://www.turboCAD.com/3DPrinters/RapMan31SingleHead/tabid/1936/Default.aspx>>. Acesso em: 19 nov. 2011.

VELEBA, D.; FELKEL, P. **Survey of Errors in Surface Representation and Their Detection and Correction**. Czech Technical University, Czech Republic, 2007. Disponível em: <http://wscg.zcu.cz/wscg2007/Papers_2007/short/B79-full.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2012.

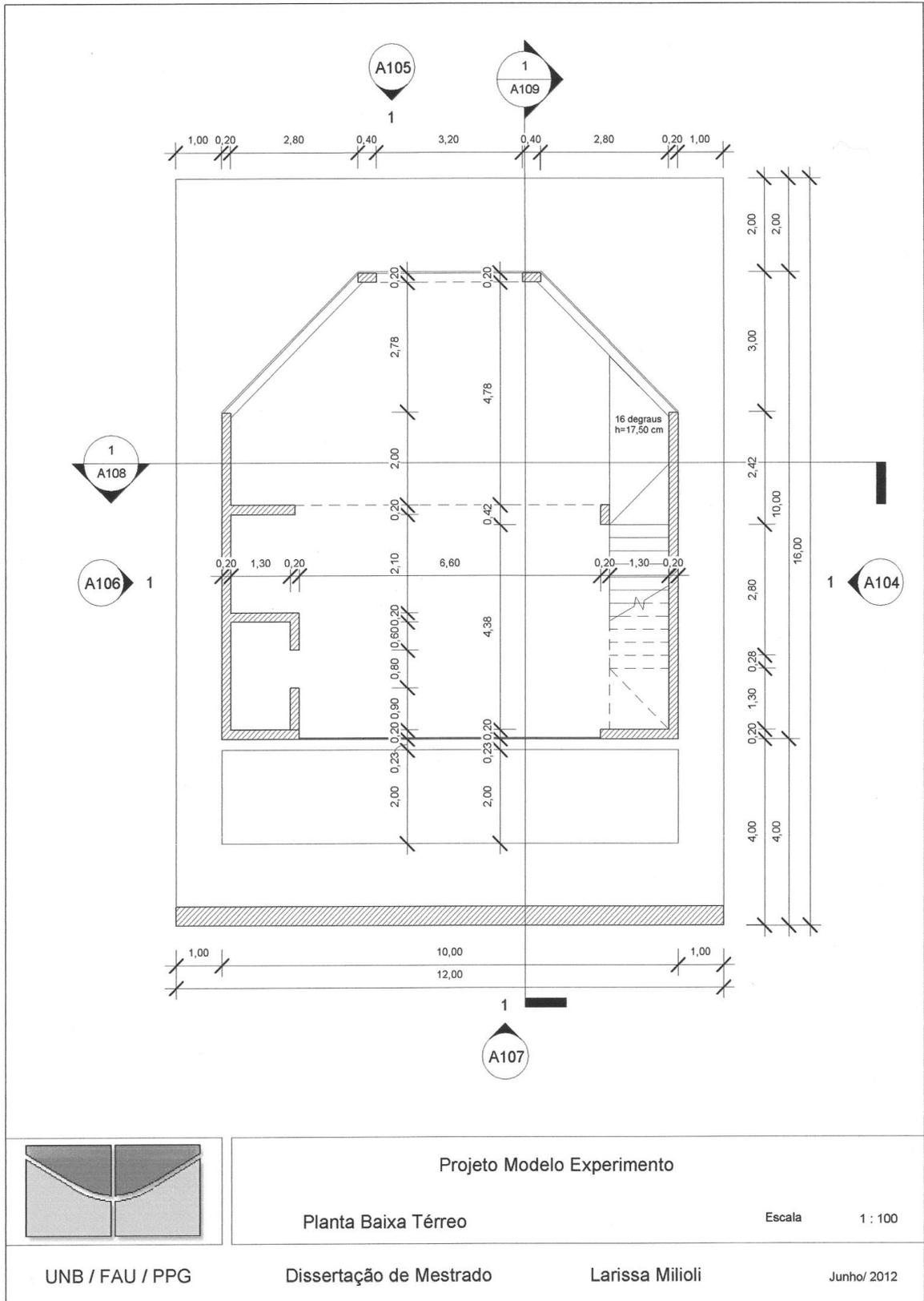
WIKIPÉDIA . **Épura**. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%89pura>>. Acesso em 15 ago. 2011.

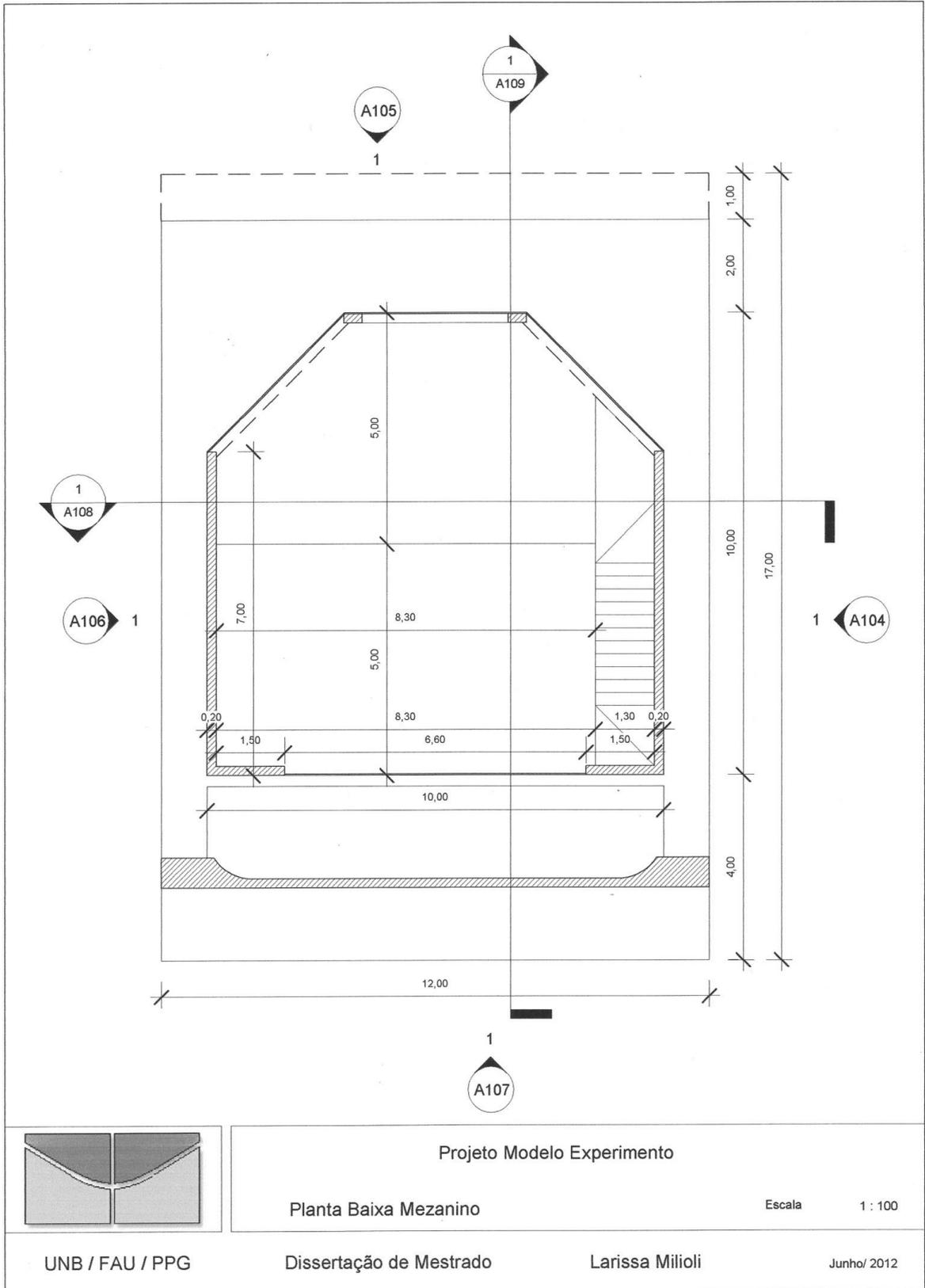
WIKIPÉDIA. **Joseph-Marie Jacquard**. Disponível em:
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Joseph-Marie_Jacquard>. Acesso em: 13 abr. 2012.

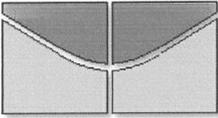
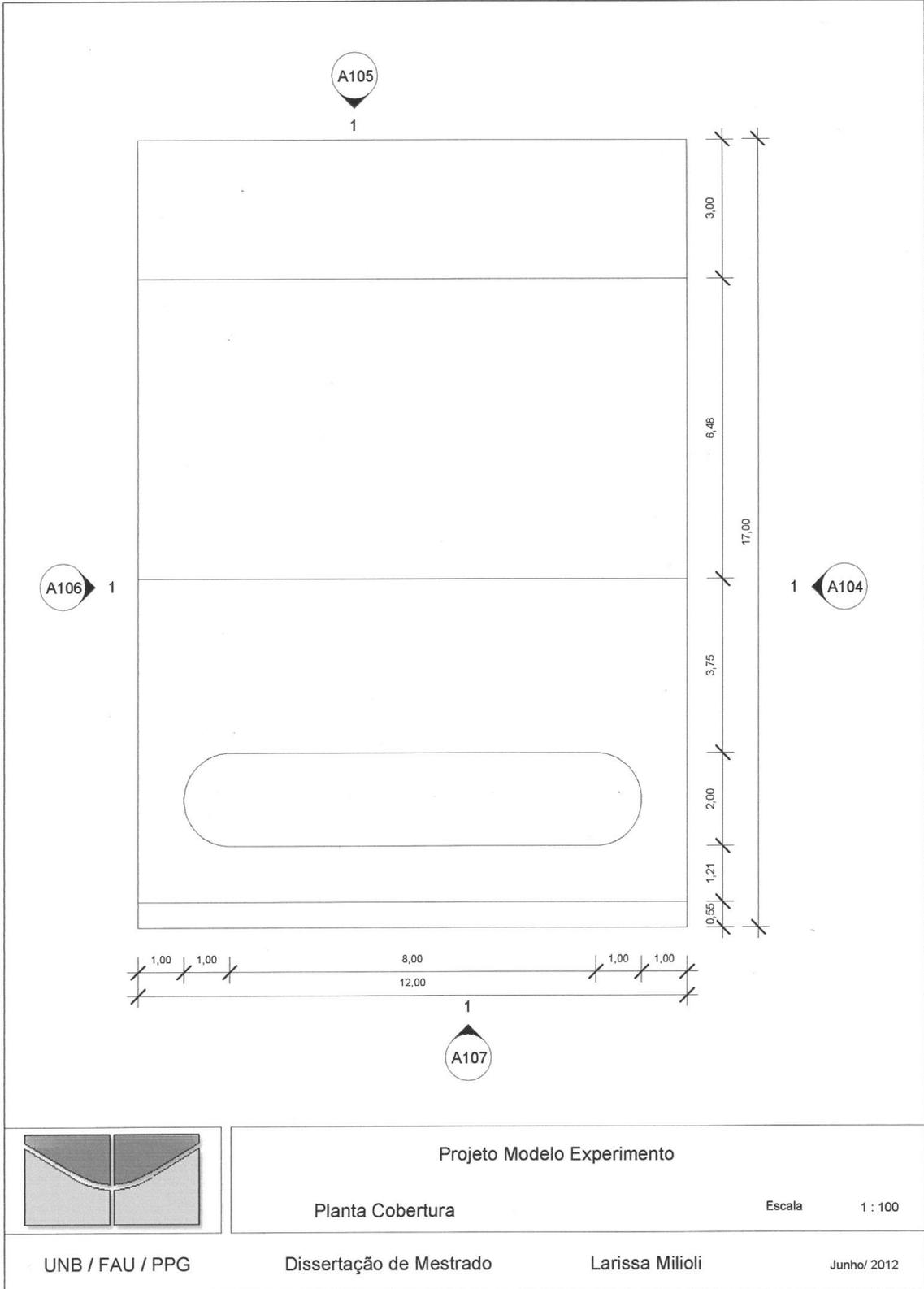
ZCORP. **Zprinter 310 plus**. Disponível em: <<http://www.zcorp.com/en/Products/3D-Printers/ZPrinter-310-Plus/spage.aspx>>. Acesso em: 25 out. 2011.

ZEVI, Bruno. **Saber Ver a Arquitetura**. 6. Ed. Capítulo 2, São Paulo: Martins Fontes, 2009.

APÊNDICE A - DESENHOS DO PROJETO ARQUITETÔNICO DO MODELO DO EXPERIMENTO







Projeto Modelo Experimento

Planta Cobertura

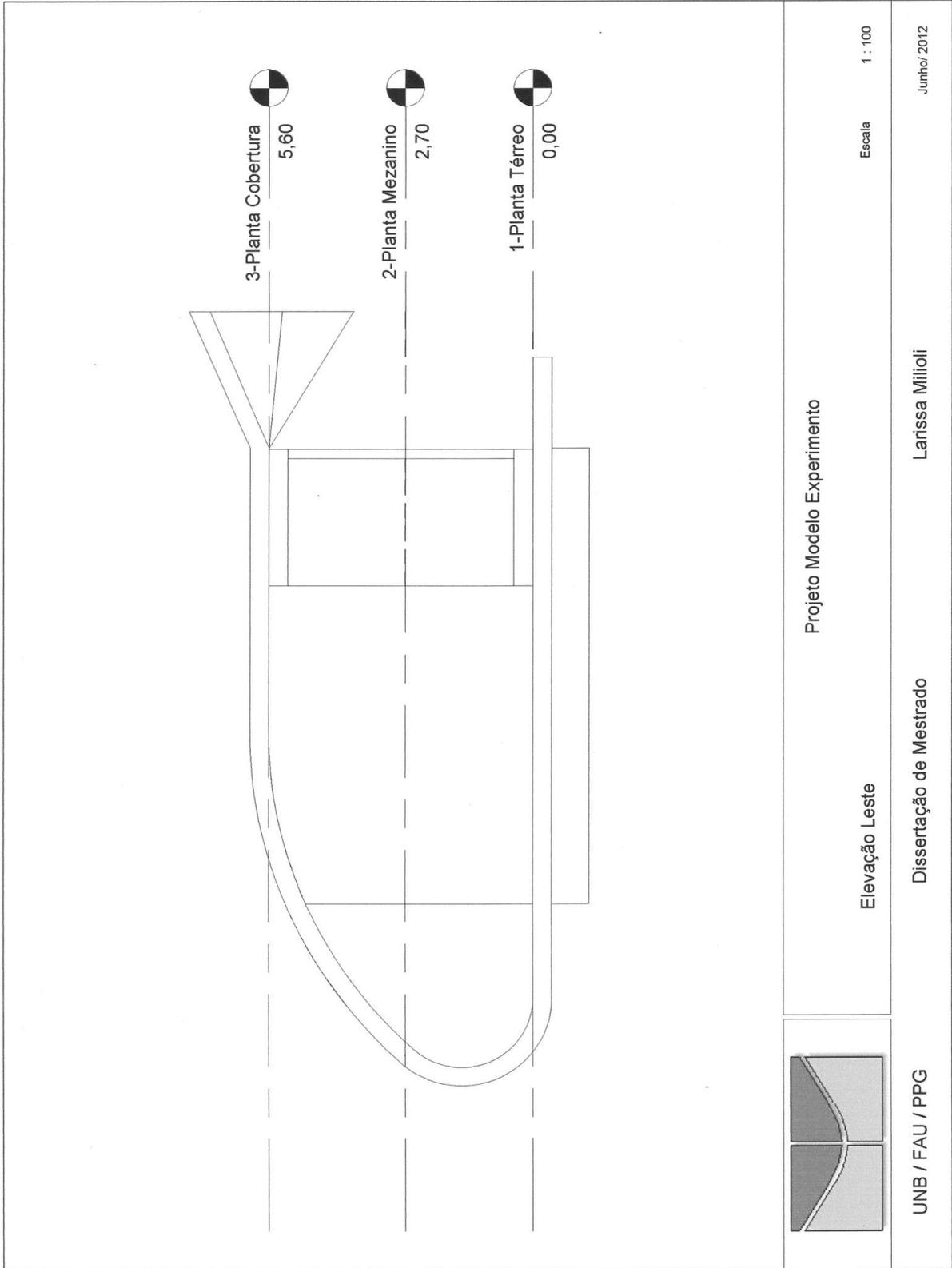
Escala 1 : 100

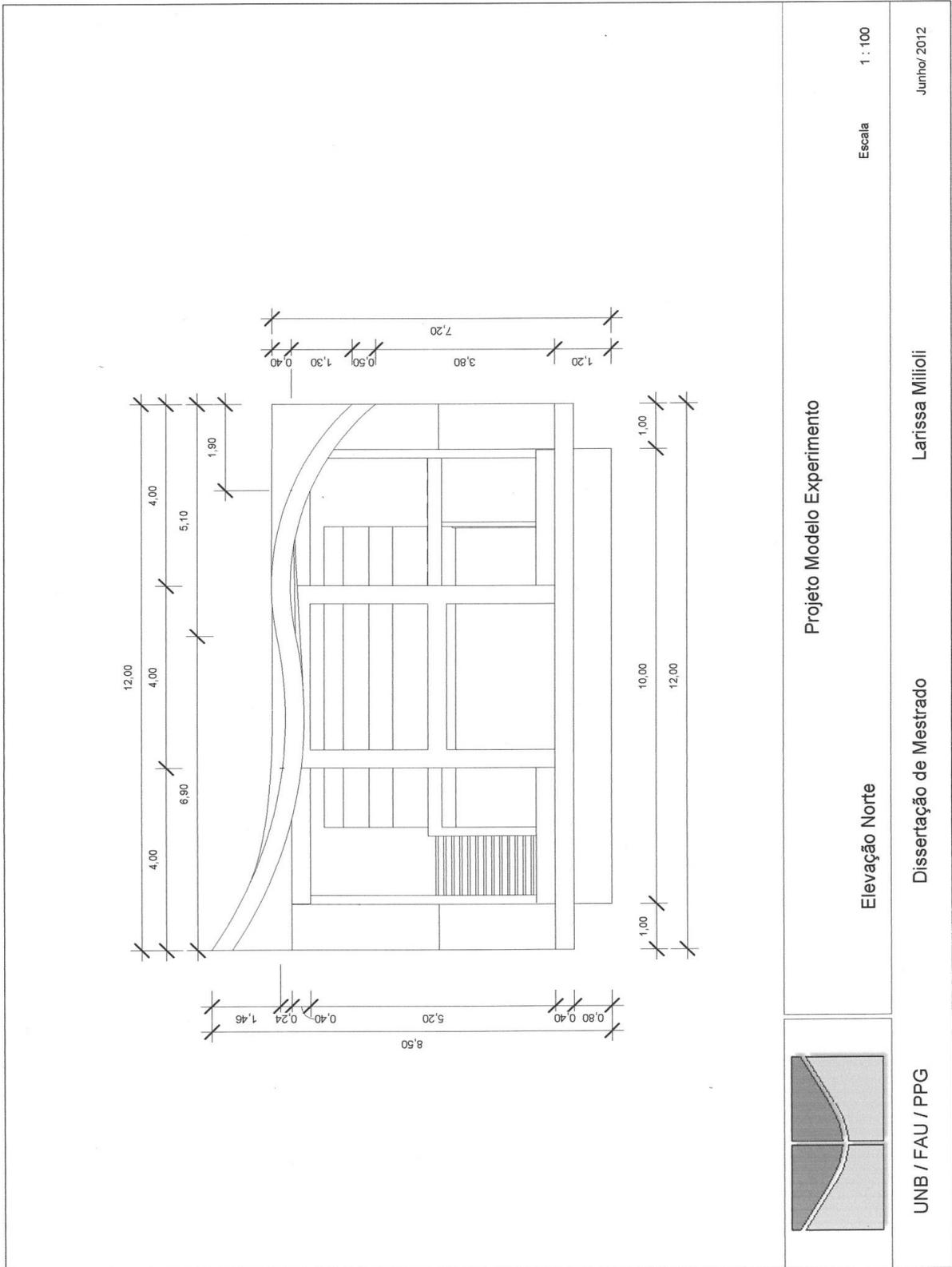
UNB / FAU / PPG

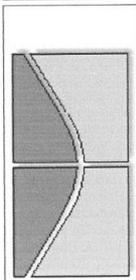
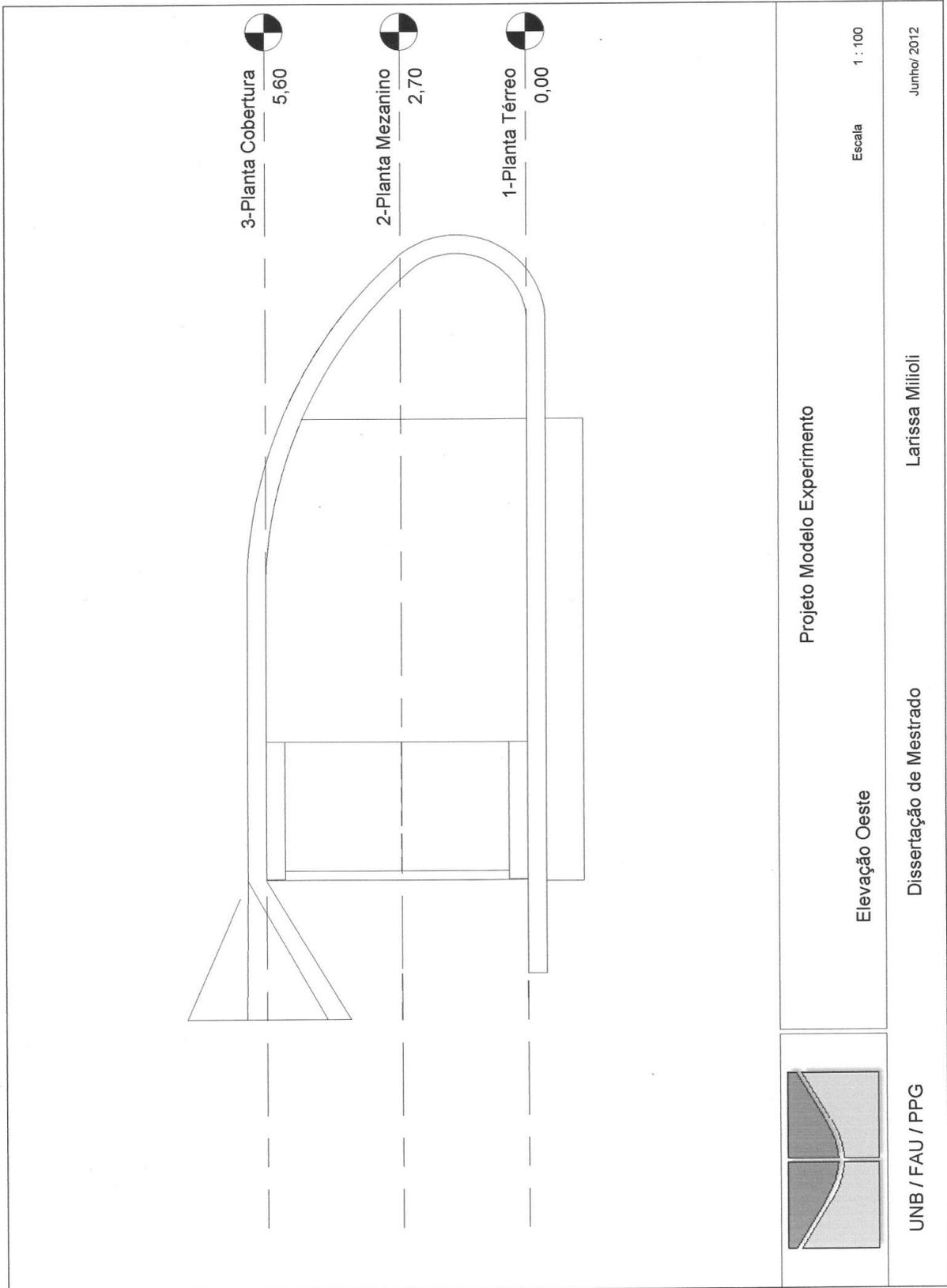
Dissertação de Mestrado

Larissa Milioli

Junho/ 2012







Projeto Modelo Experimento

Escala 1 : 100

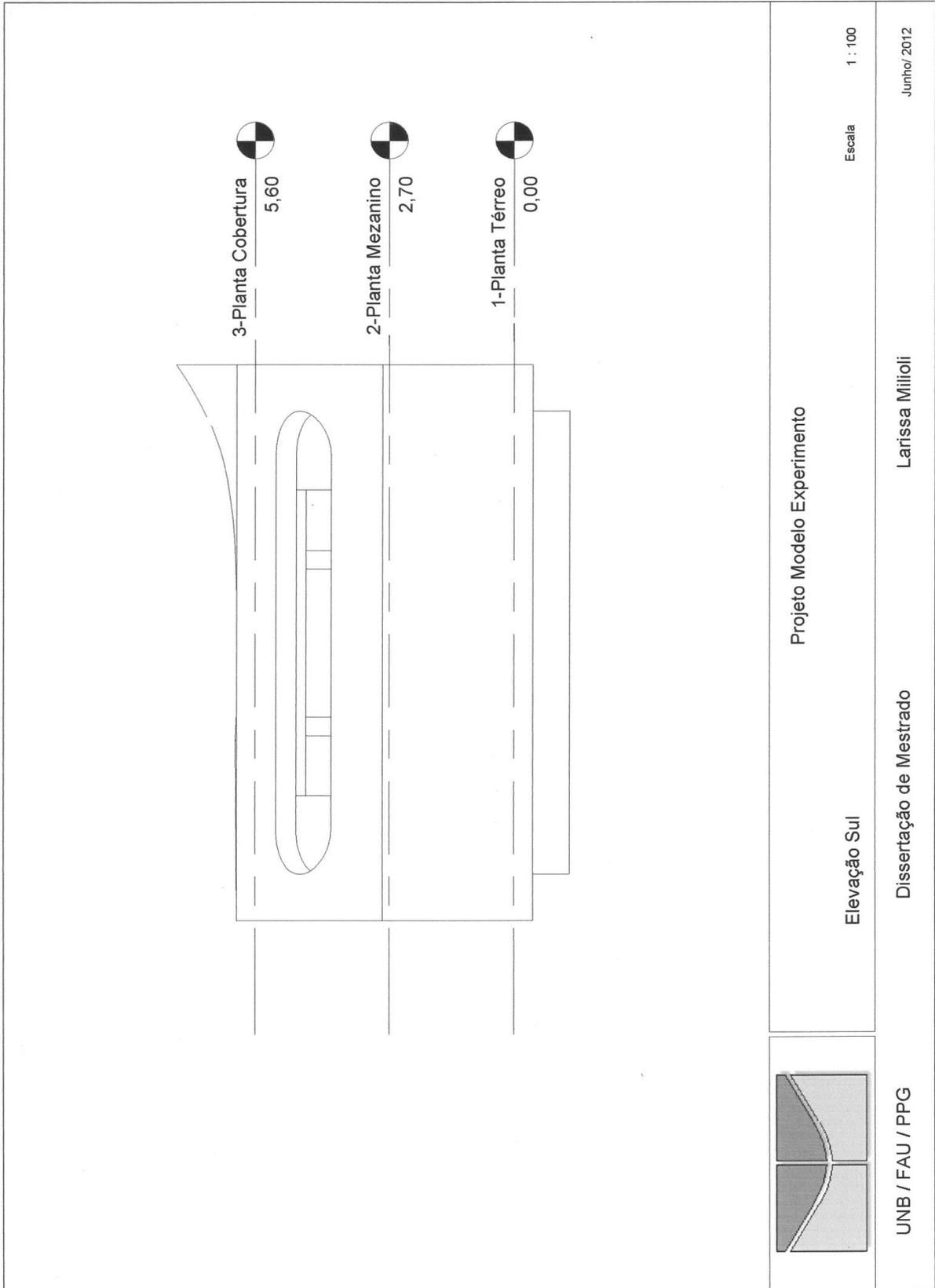
Elevação Oeste

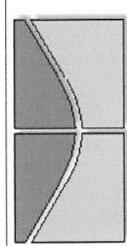
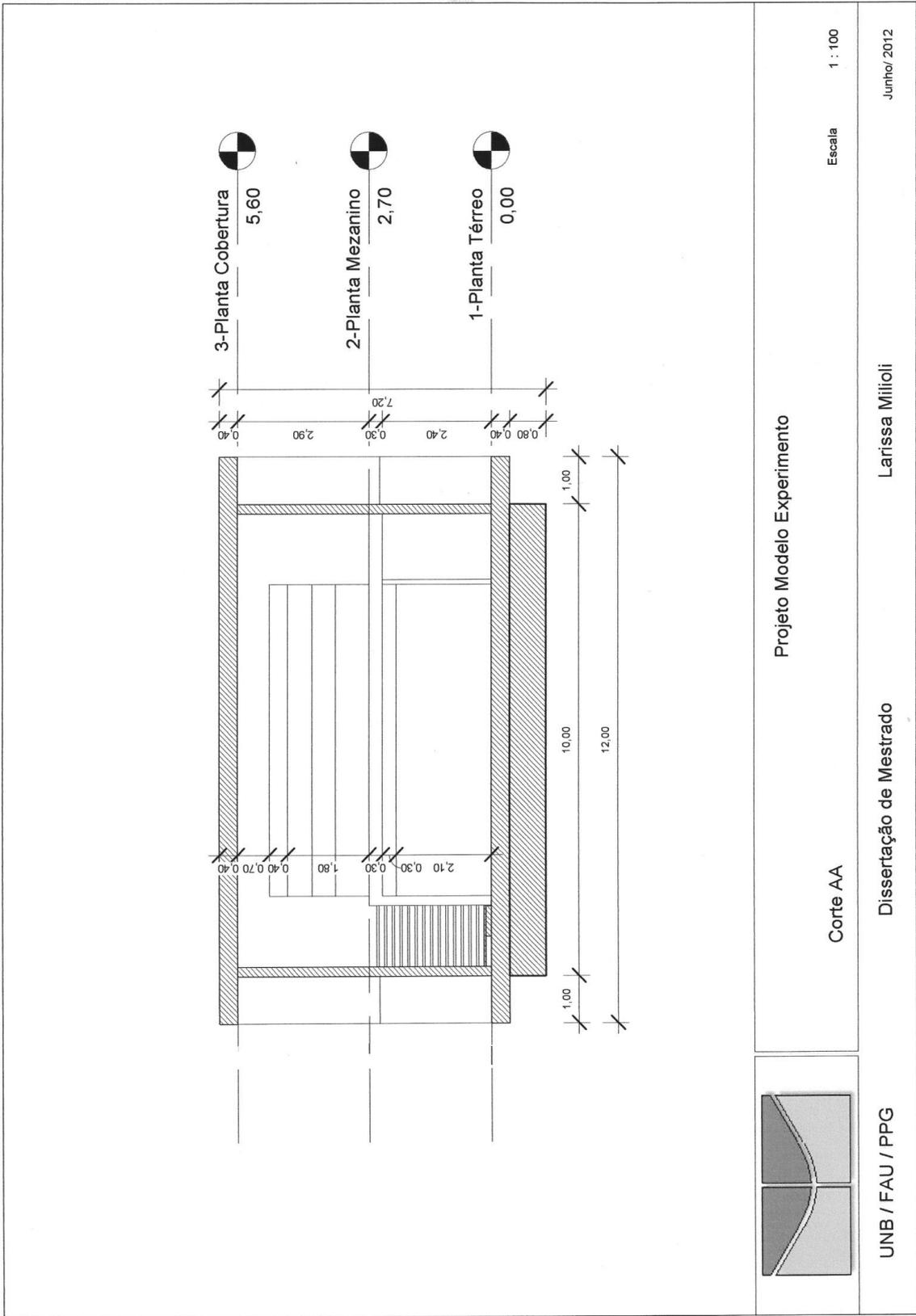
UNB / FAU / PPG

Dissertação de Mestrado

Larissa Milioli

Junho/2012





UNB / FAU / PPG

Projeto Modelo Experimento

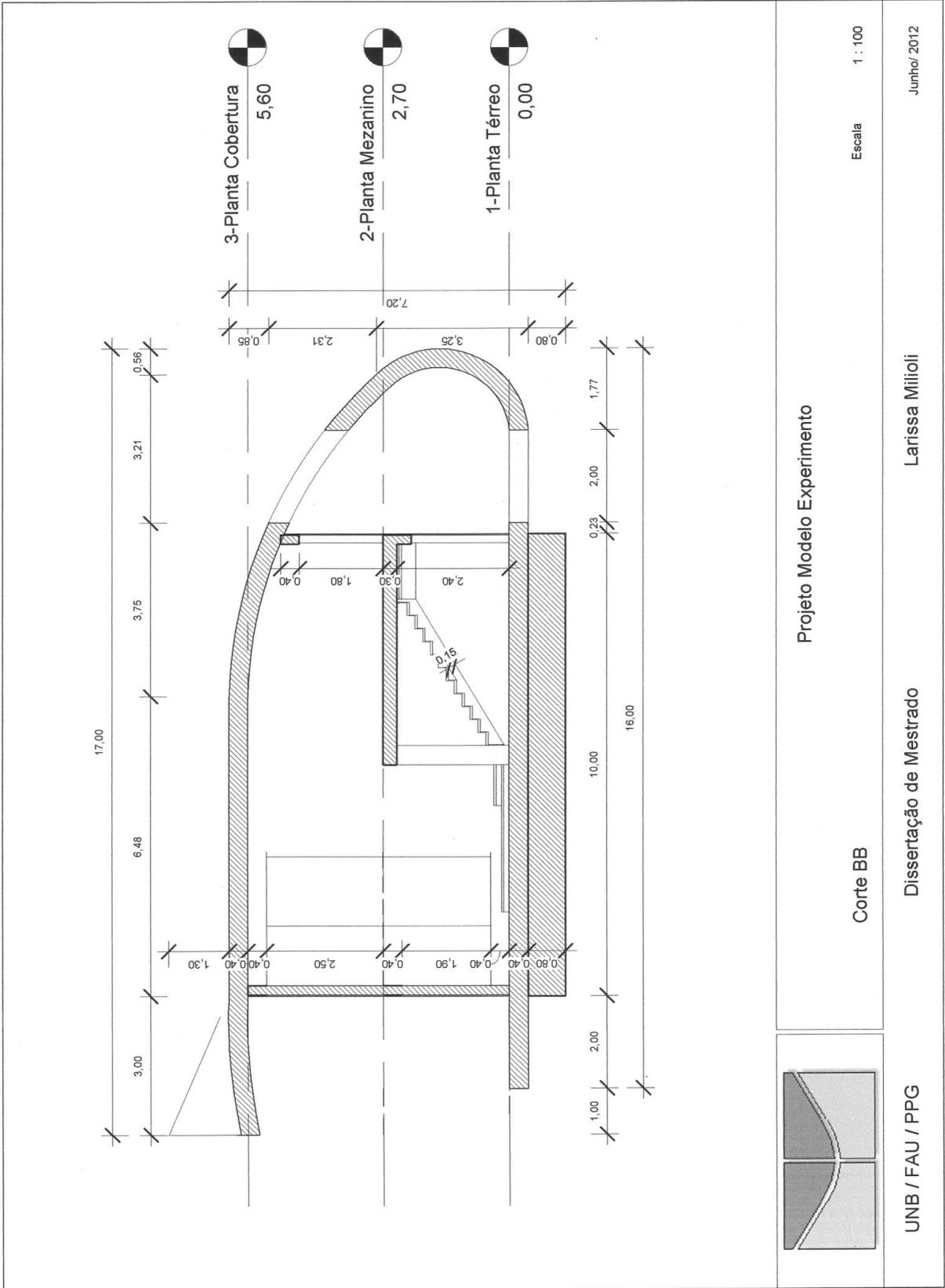
Corte AA

Dissertação de Mestrado

Larissa Milioli

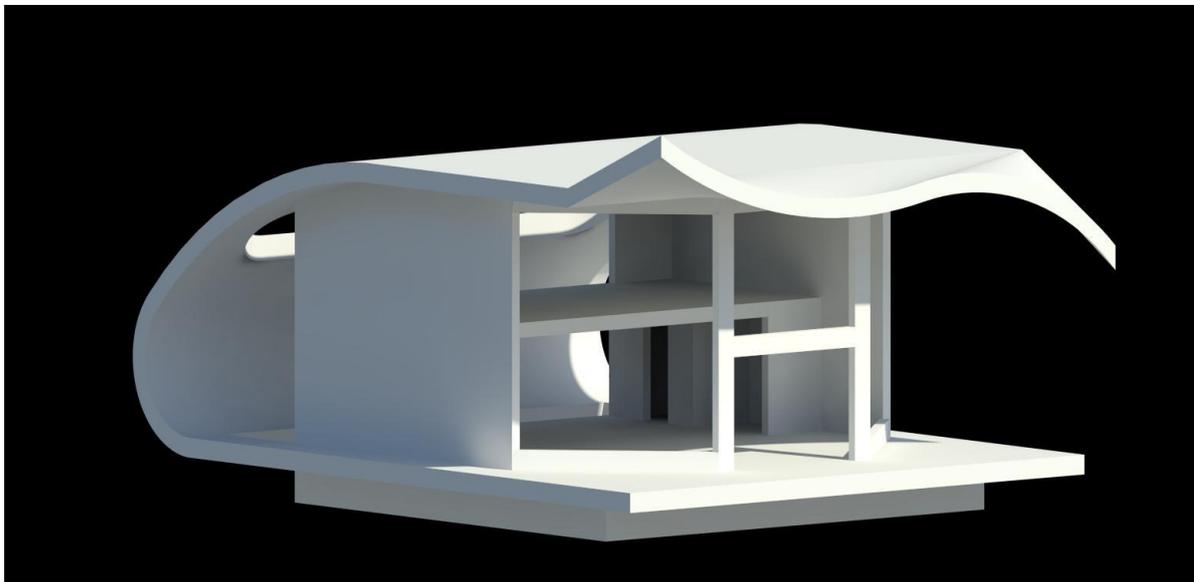
Escala 1 : 100

Junho/ 2012

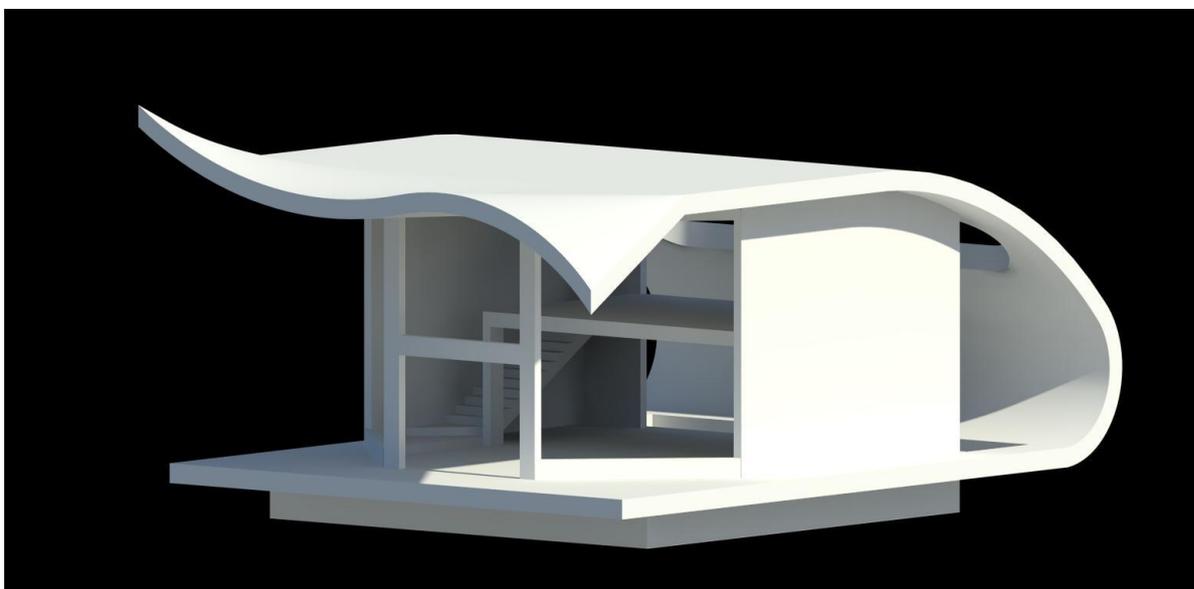


APÊNDICE B - VISTAS EXTERNAS RENDERIZADAS DOS MODELOS CAD

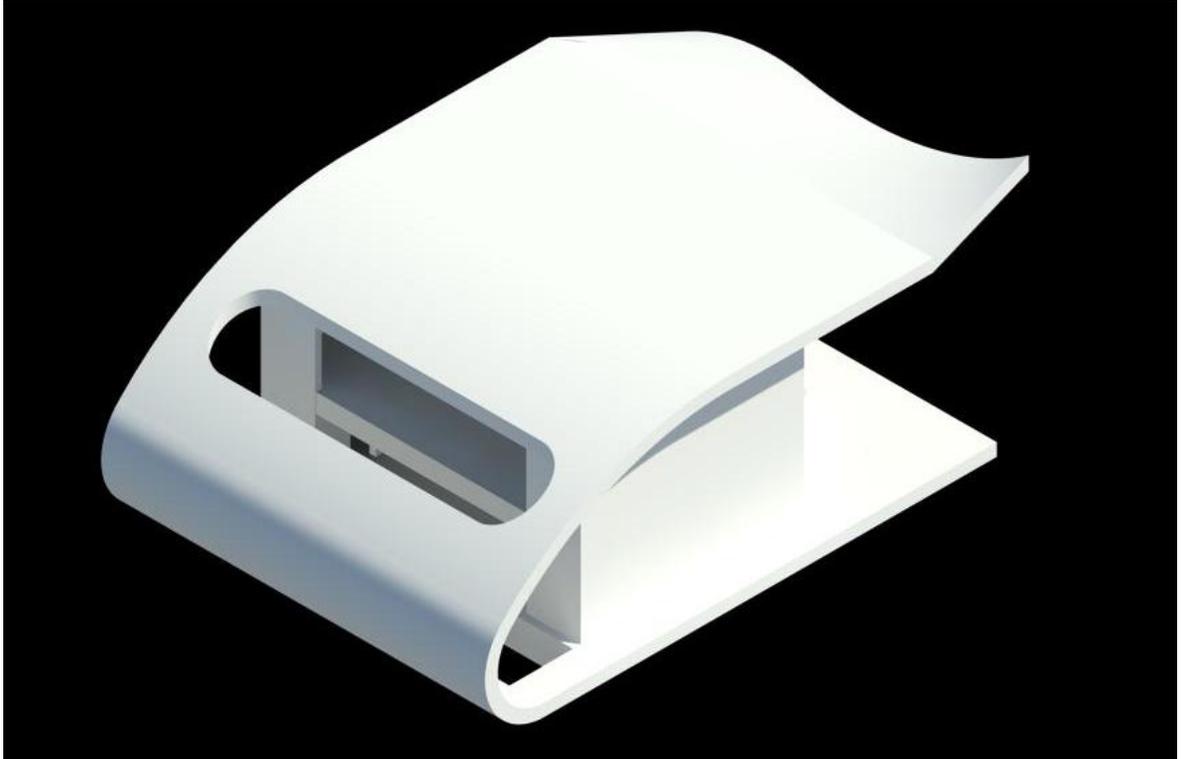
CAD



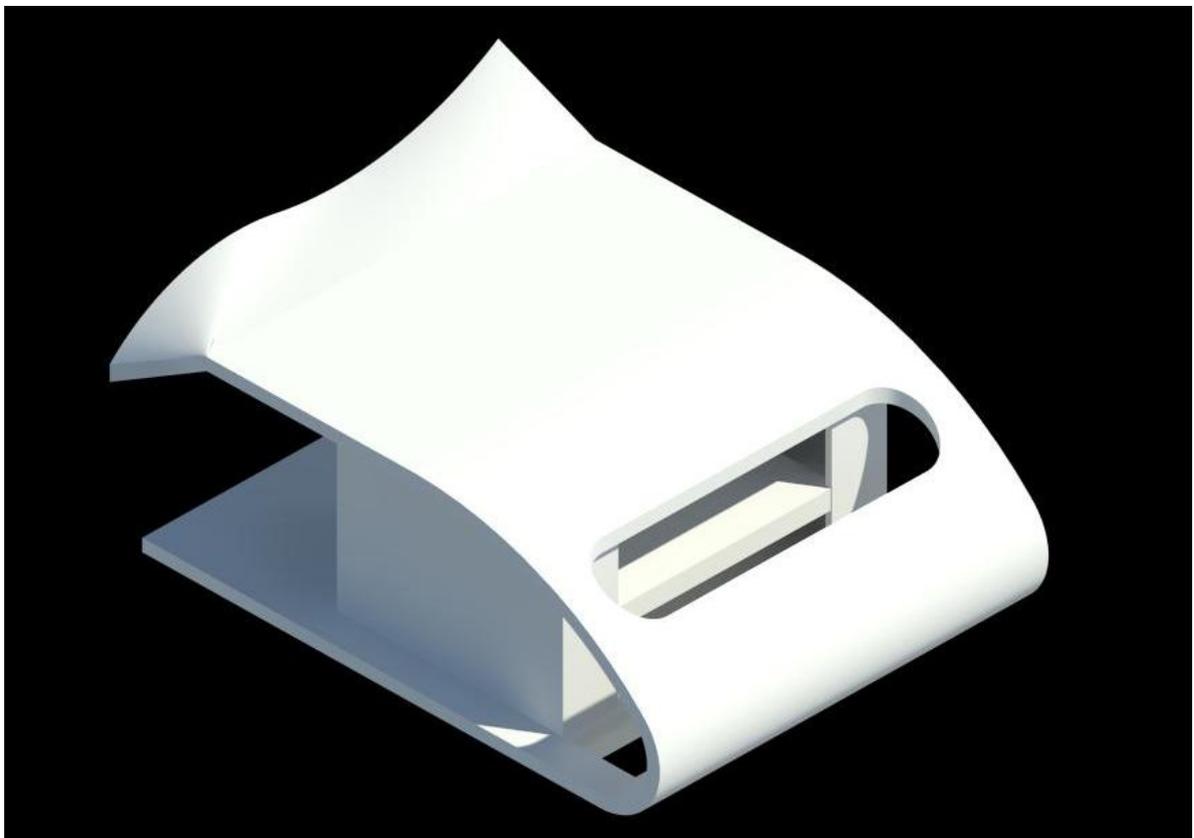
VISTA NORDESTE – MODELO CAD A (REVIT)



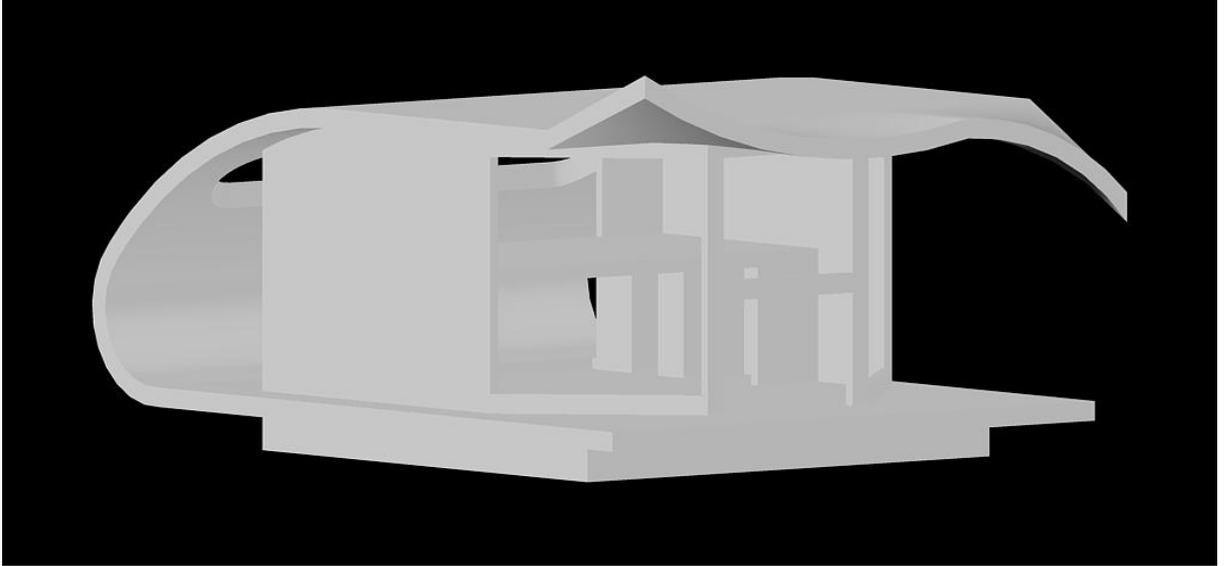
VISTA NOROESTE – MODELO CAD A (REVIT)



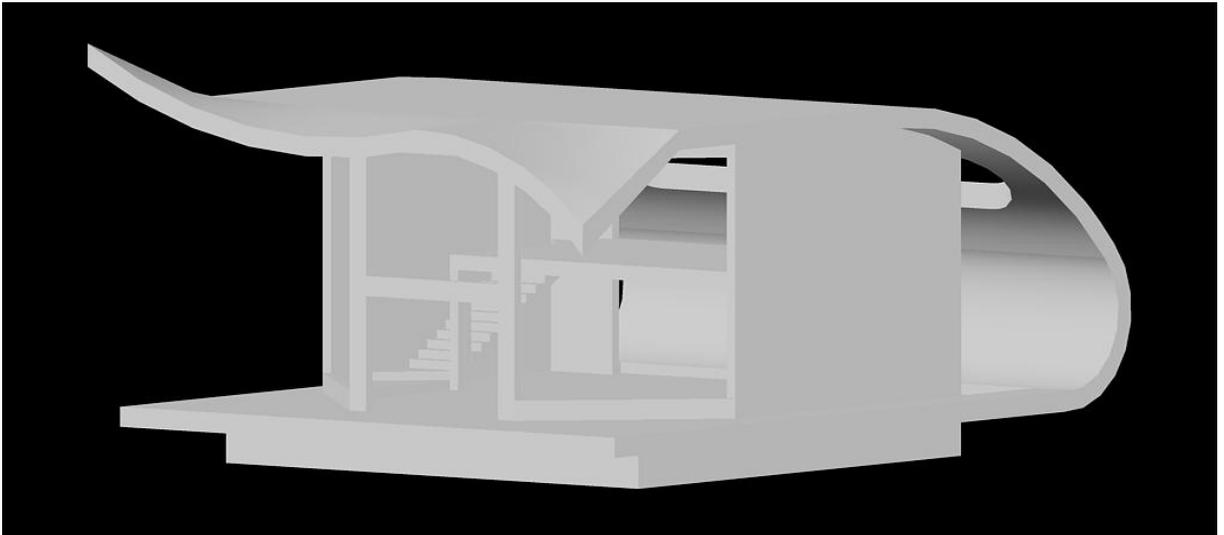
VISTA SUDESTE – MODELO CAD A (REVIT)



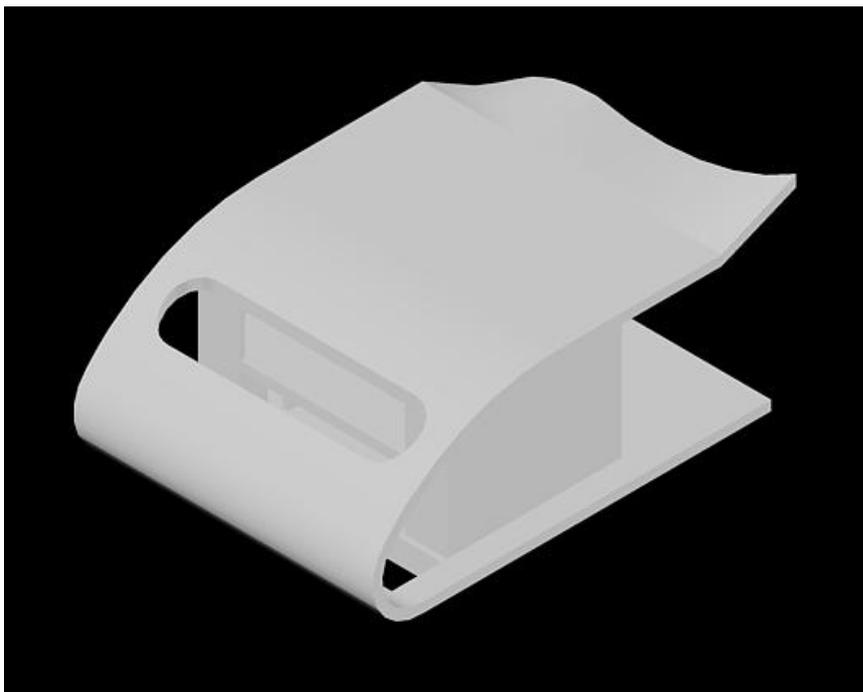
VISTA SUDOESTE – MODELO CAD A (REVIT)



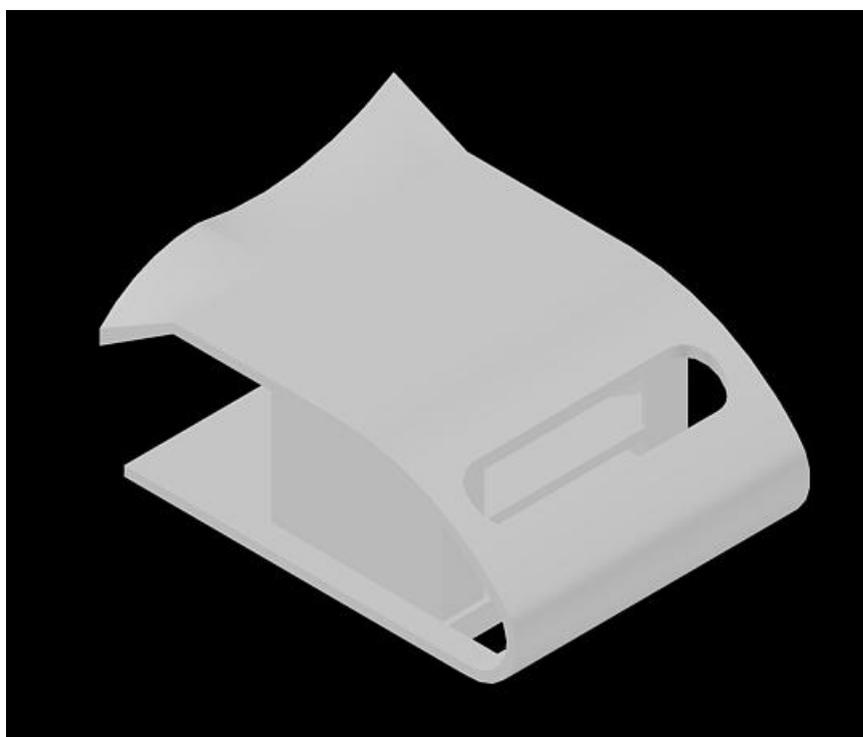
VISTA NORDESTE – MODELO CAD B (AUTOCAD)



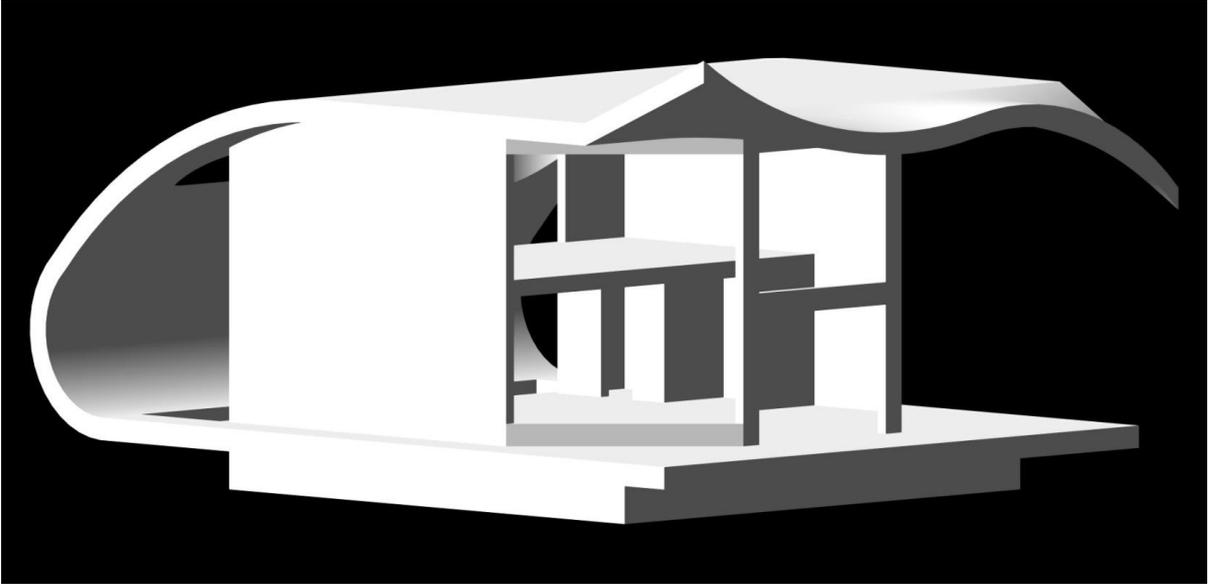
VISTA NOROESTE – MODELO CAD B (AUTOCAD)



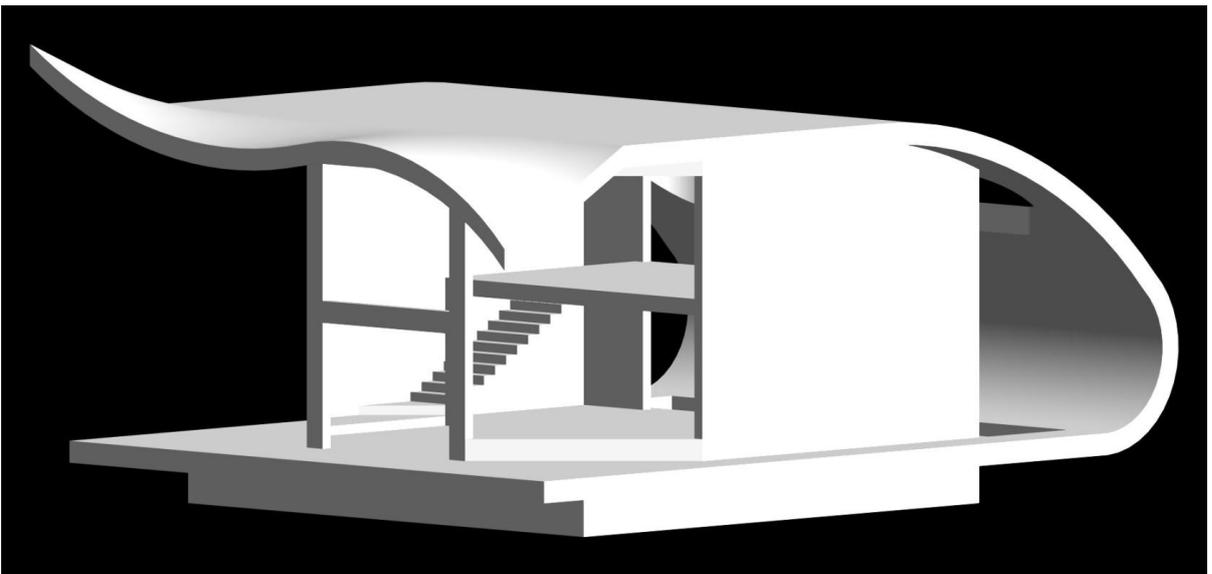
VISTA SUDESTE – MODELO CAD B (AUTOCAD)



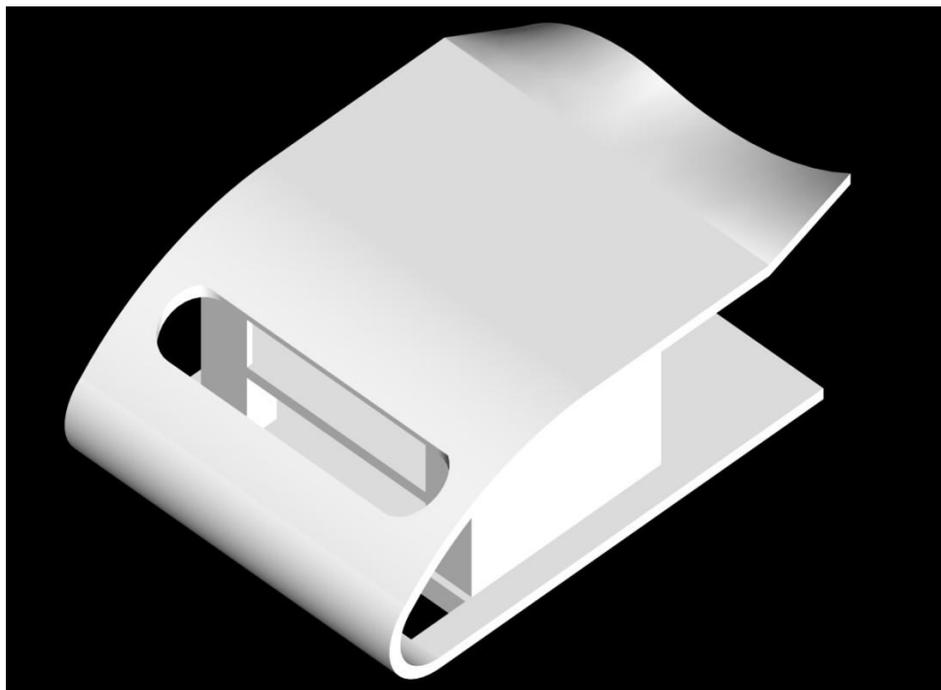
VISTA SUDOESTE – MODELO CAD B (AUTOCAD)



VISTA NORDESTE – MODELO CAD C (FORMZ)



VISTA NOROESTE – MODELO CAD C (FORMZ)

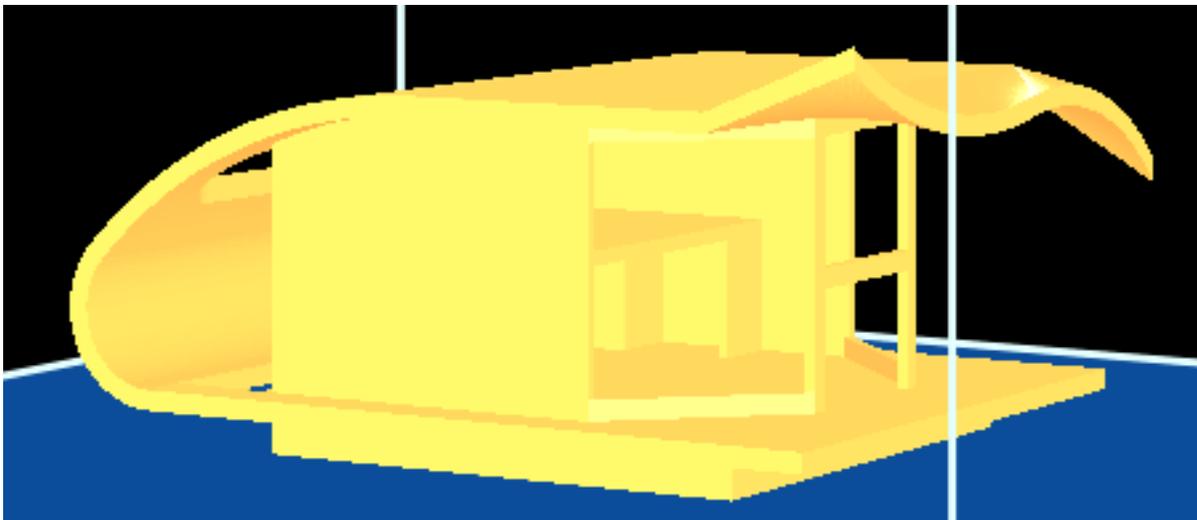


VISTA SUDESTE – MODELO CAD C (FORMZ)

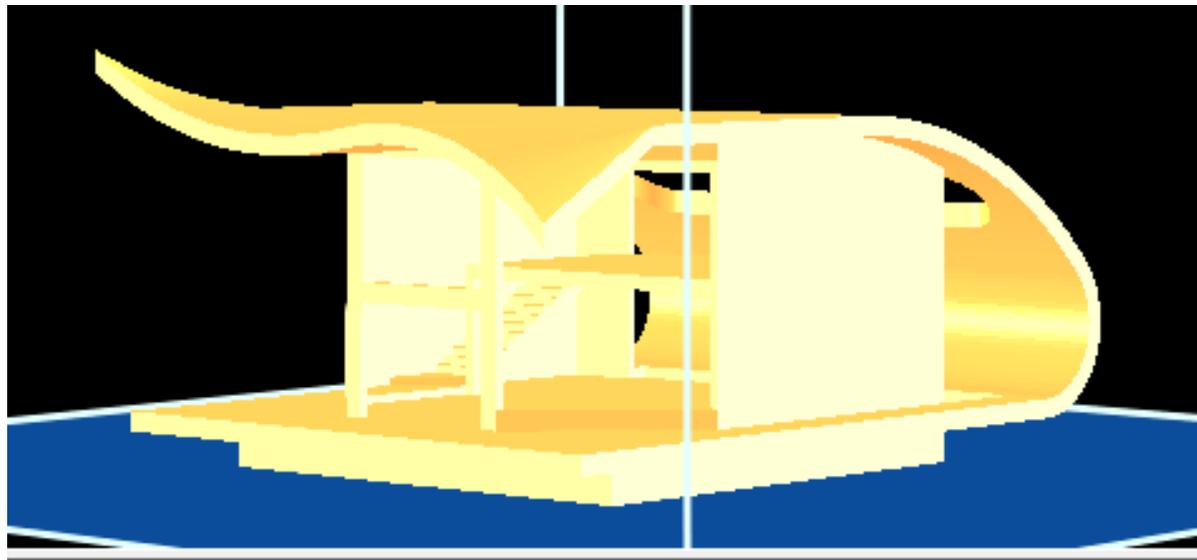


VISTA SUDOESTE – MODELO CAD C (FORMZ)

**APÊNDICE C - VISTAS EXTERNAS DOS MODELOS
IMPORTADOS PARA PROTOTIPAGEM**



VISTA NORDESTE – MODELO AX (REVIT > REPLICATORG)



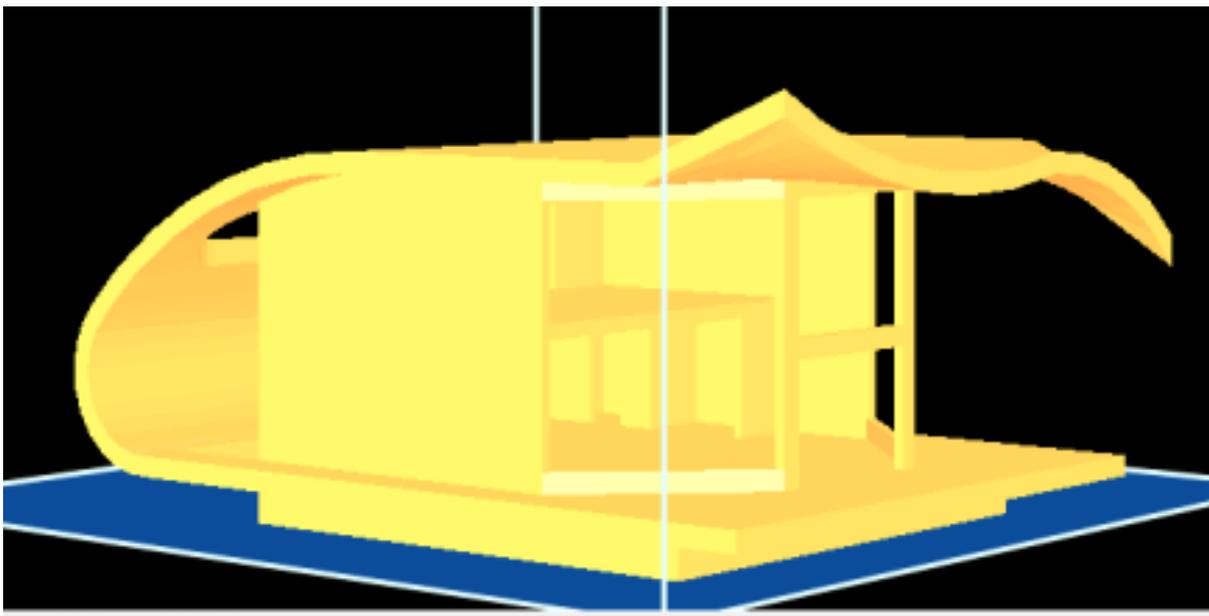
VISTA NOROESTE – MODELO AX (REVIT > REPLICATORG)



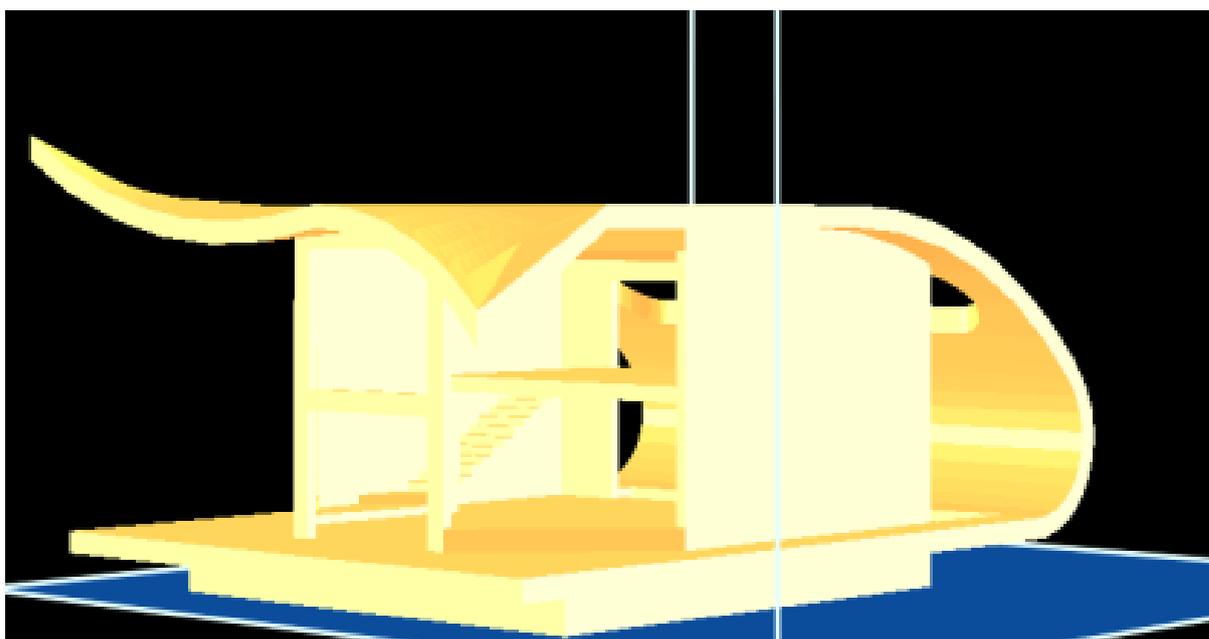
VISTA SUDESTE – MODELO AX (REVIT > REPLICATORG)



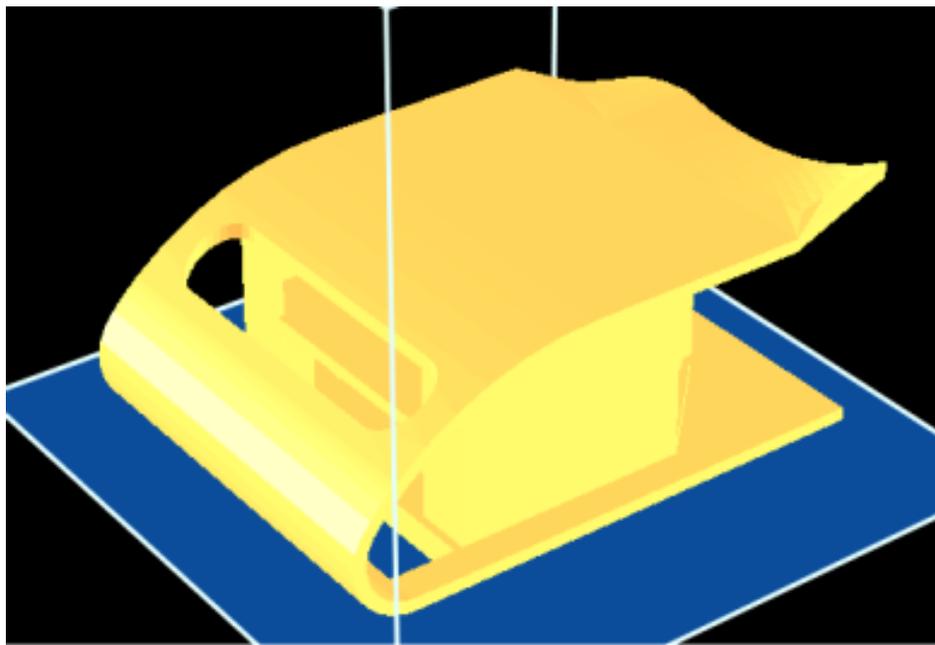
VISTA SUDOESTE – MODELO AX (REVIT > REPLICATORG)



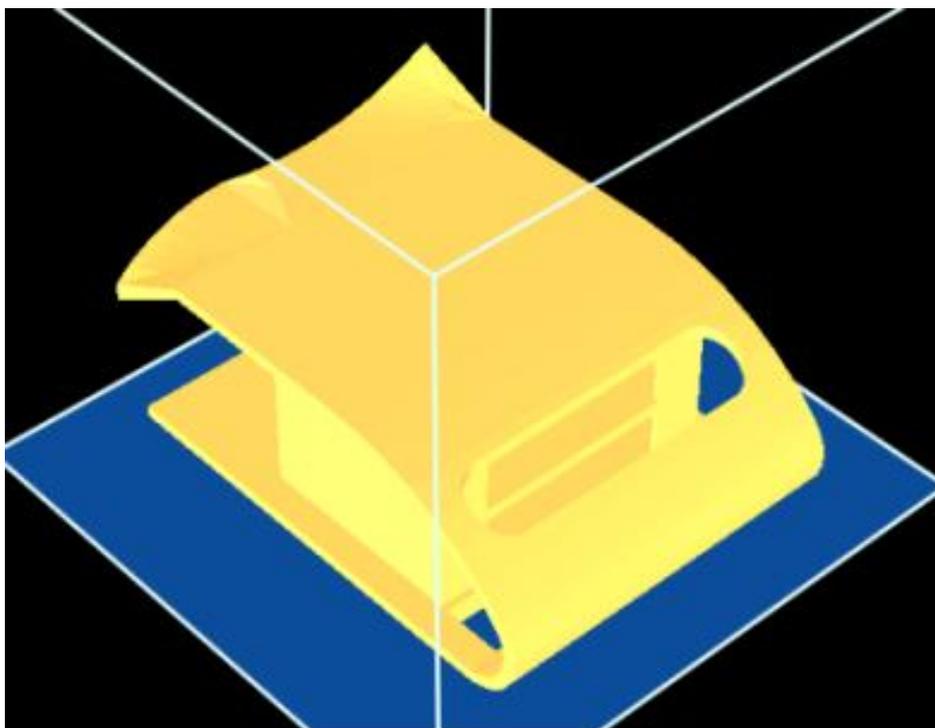
VISTA NORDESTE – MODELO BX (AUTOCAD > REPLICATORG)



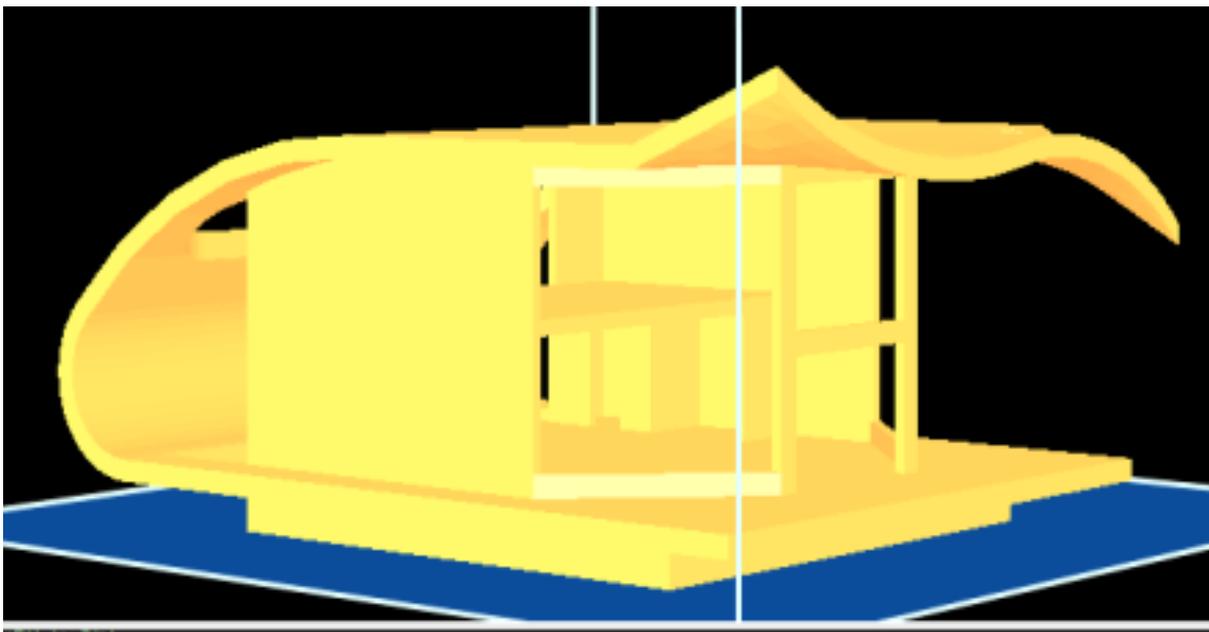
VISTA NOROESTE – MODELO BX (AUTOCAD > REPLICATORG)



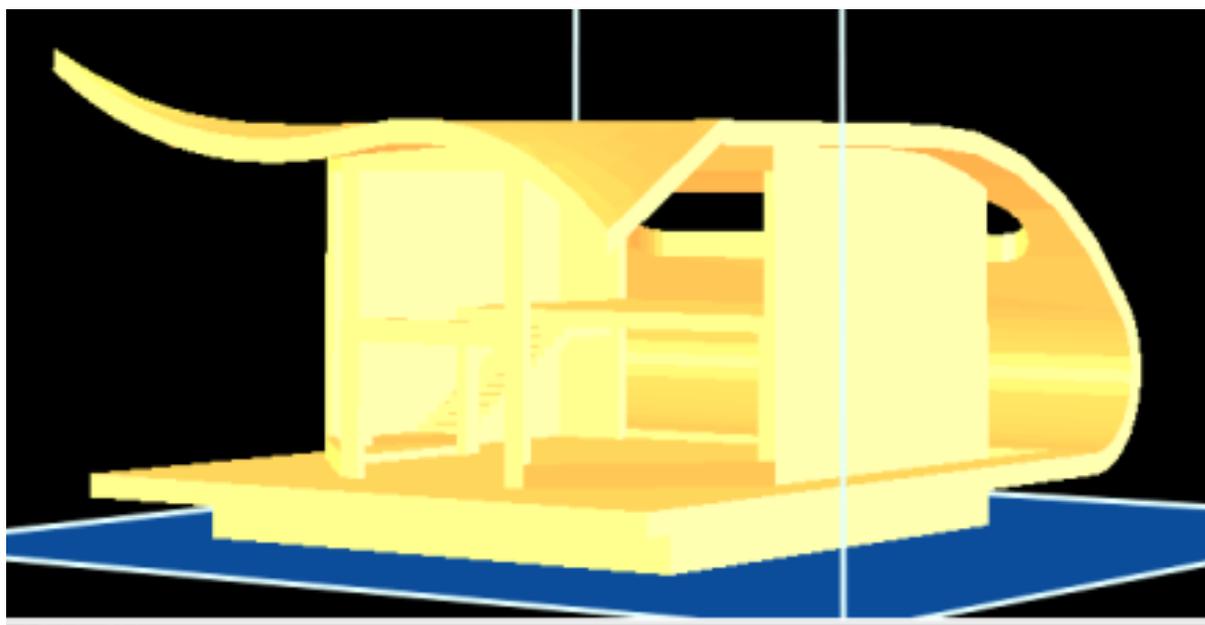
VISTA SUDESTE – MODELO BX (AUTOCAD > REPLICATORG)



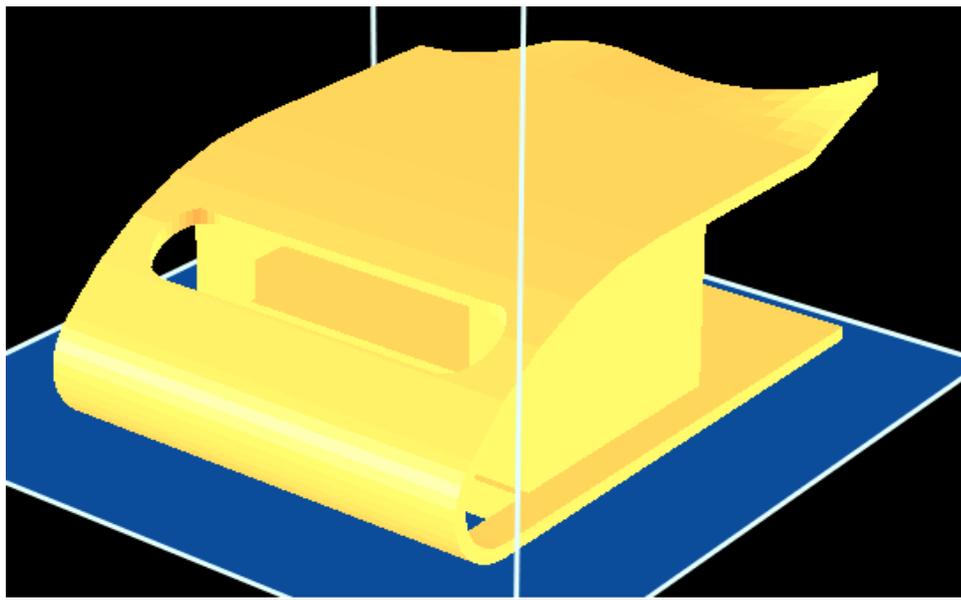
VISTA SUDOESTE – MODELO BX (AUTOCAD > REPLICATORG)



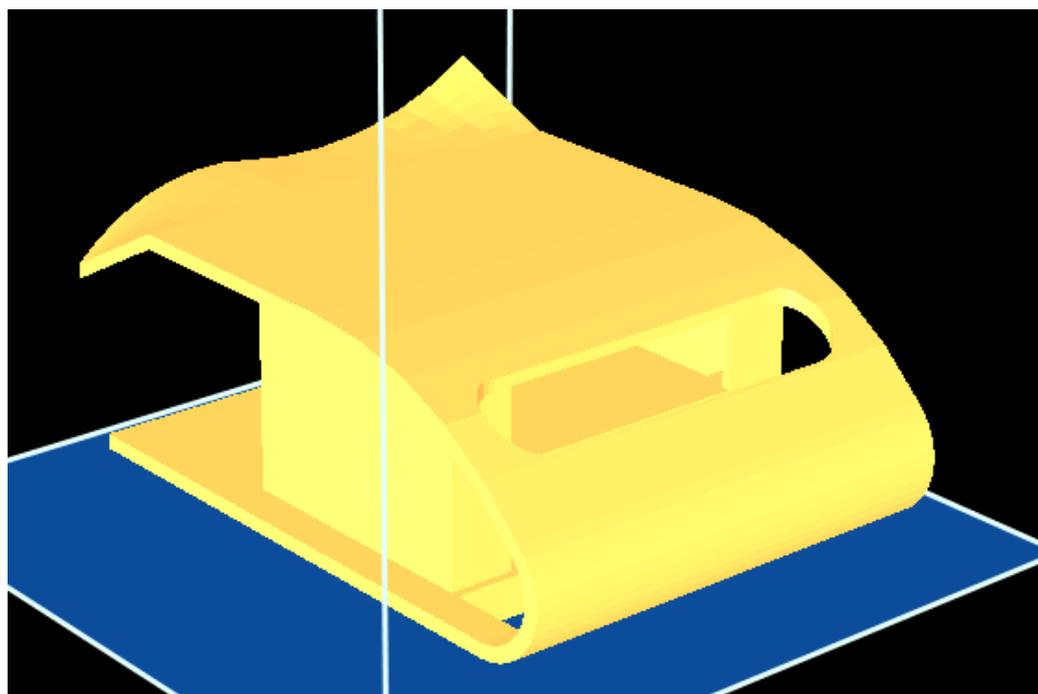
VISTA NORDESTE – MODELO CX (FORMZ > REPLICATORG)



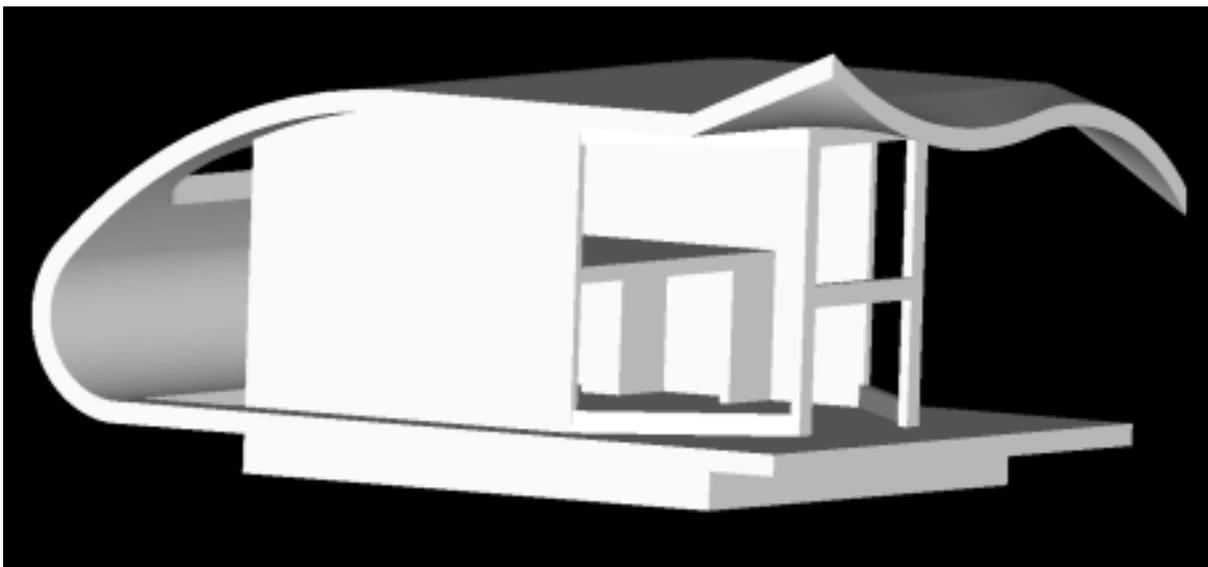
VISTA NOROESTE – MODELO CX (FORMZ > REPLICATORG)



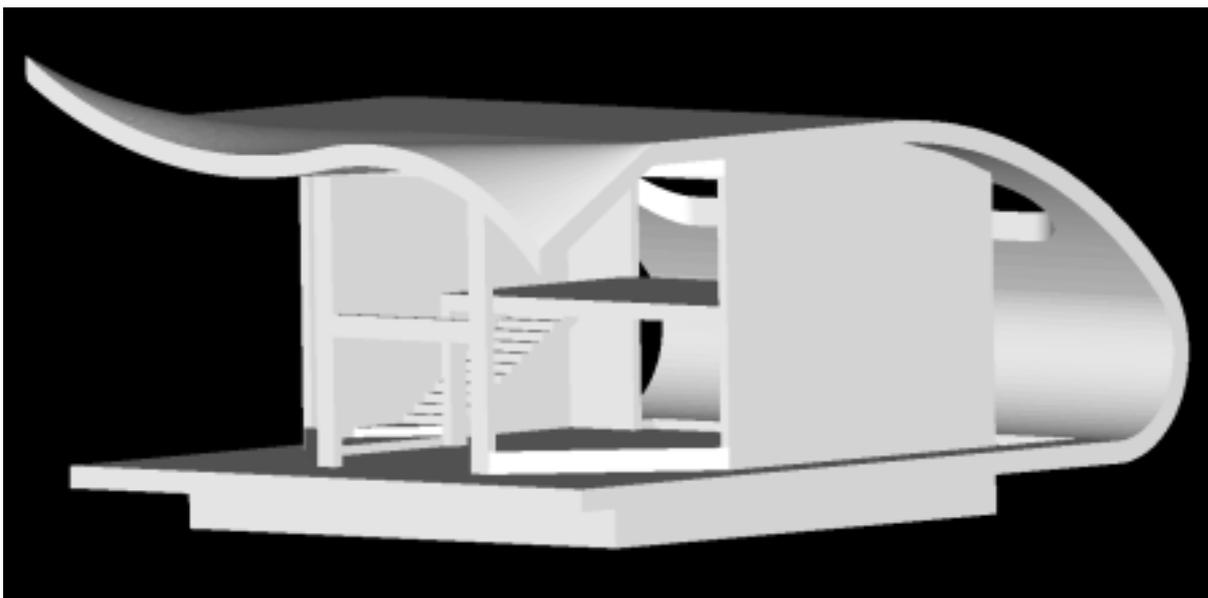
VISTA SUDESTE – MODELO CX (FORMZ > REPLICATORG)



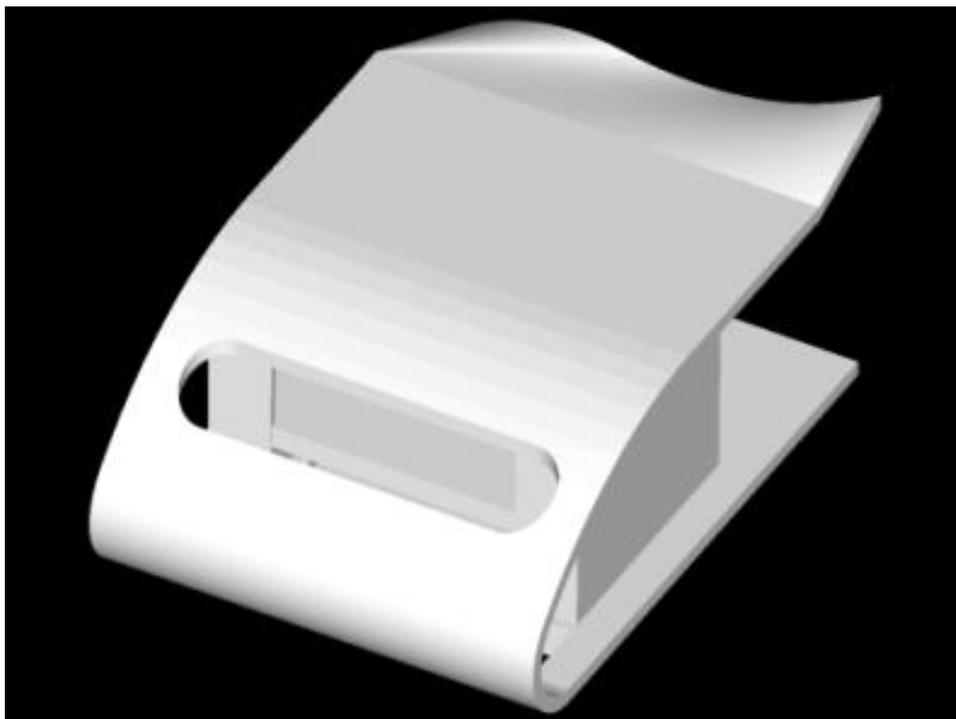
VISTA SUDOESTE – MODELO CX (FORMZ > REPLICATORG)



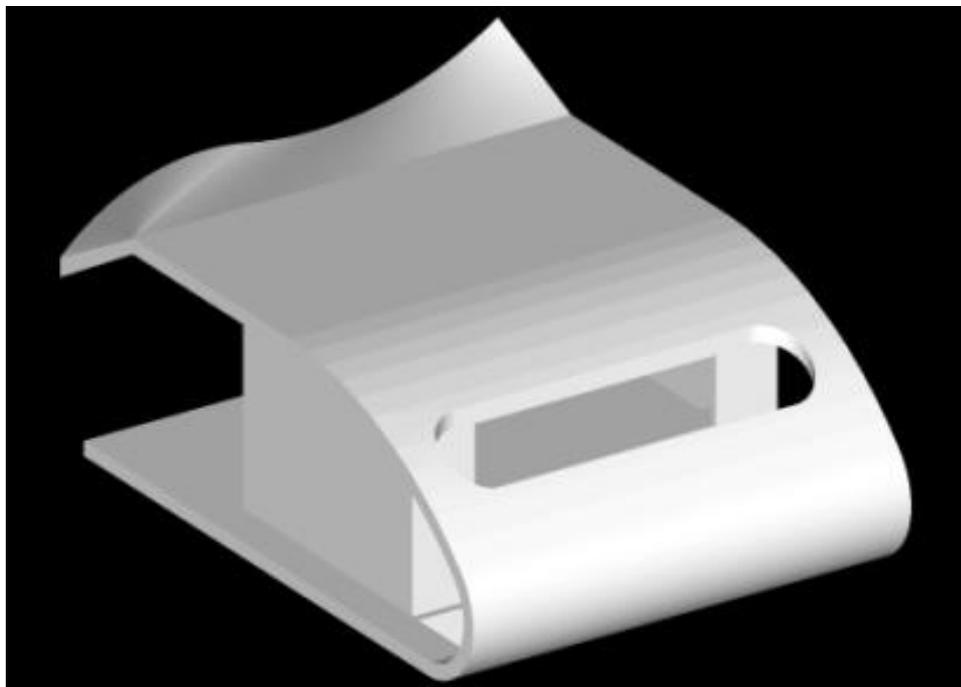
VISTA NORDESTE – MODELO AZ (REVIT > ZPRINT)



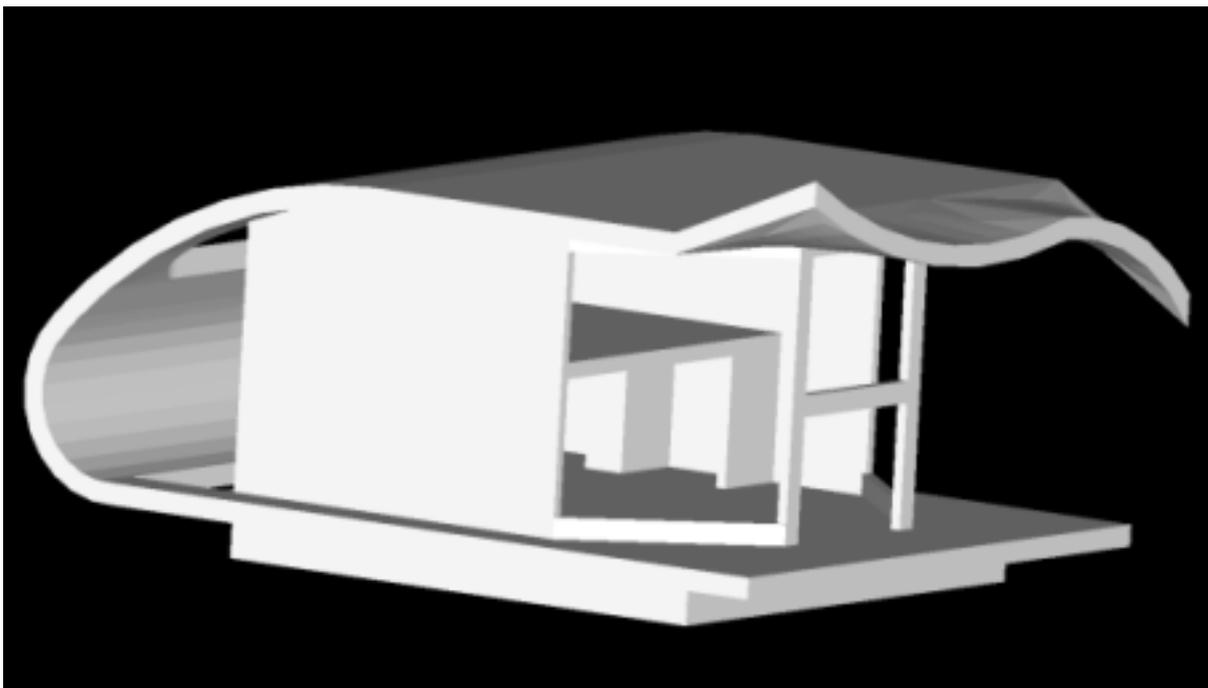
VISTA NOROESTE – MODELO AZ (REVIT > ZPRINT)



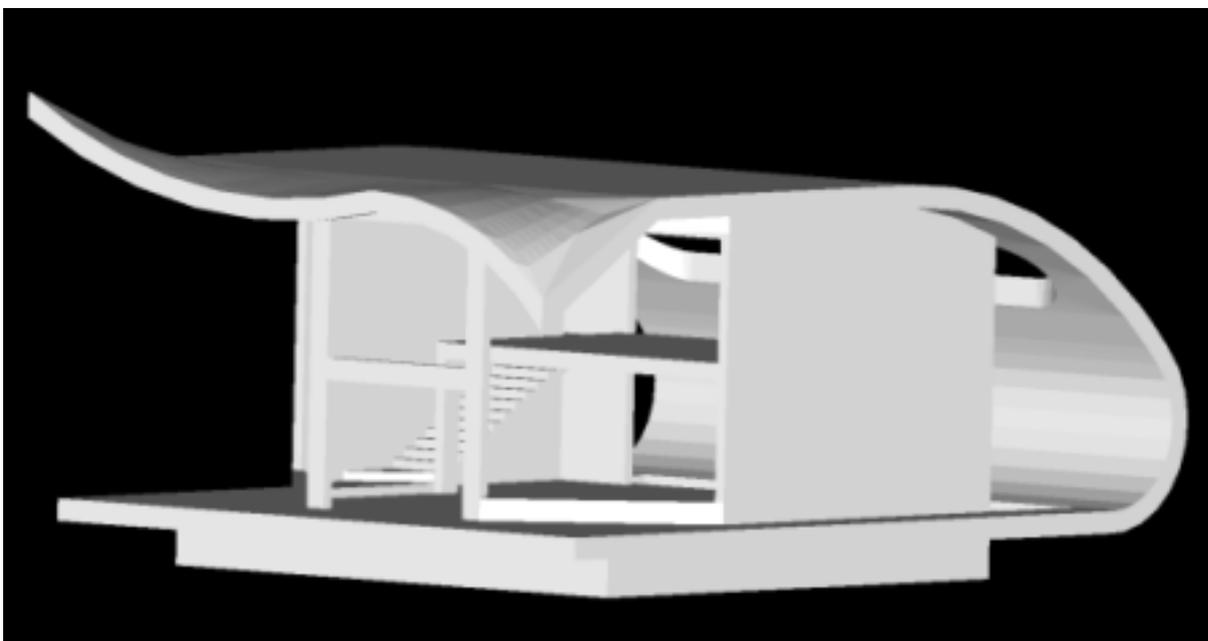
VISTA SUDESTE – MODELO AZ (REVIT > ZPRINT)



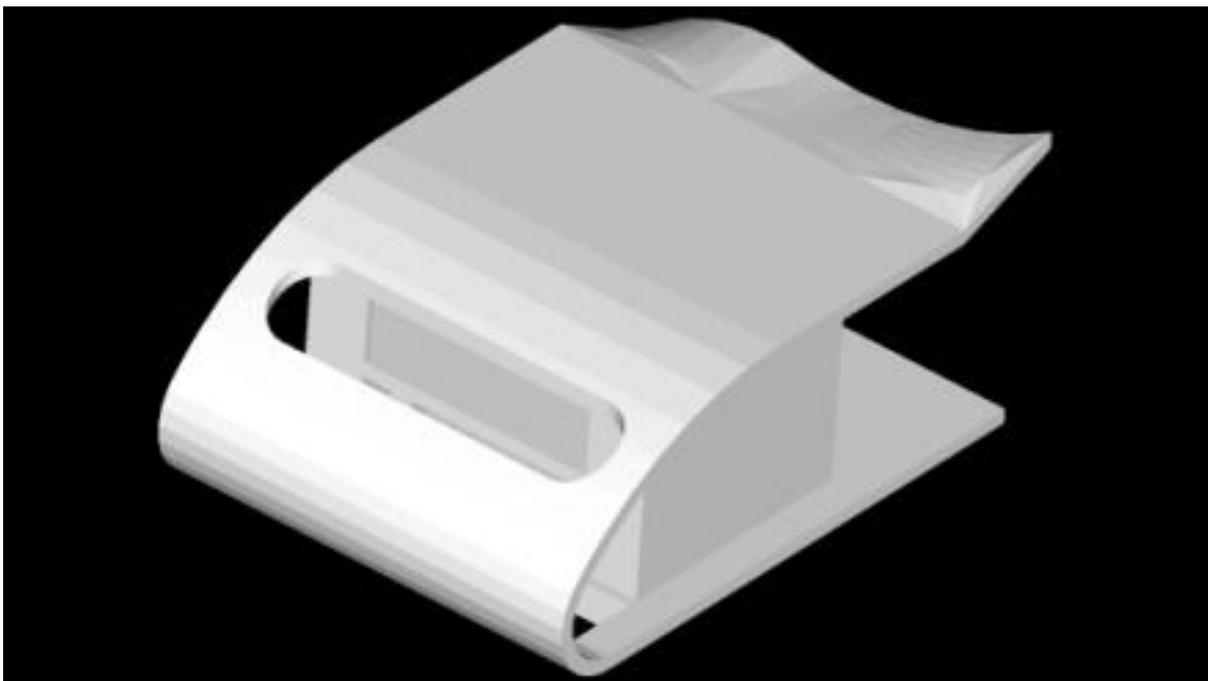
VISTA SUDOESTE – MODELO AZ (REVIT > ZPRINT)



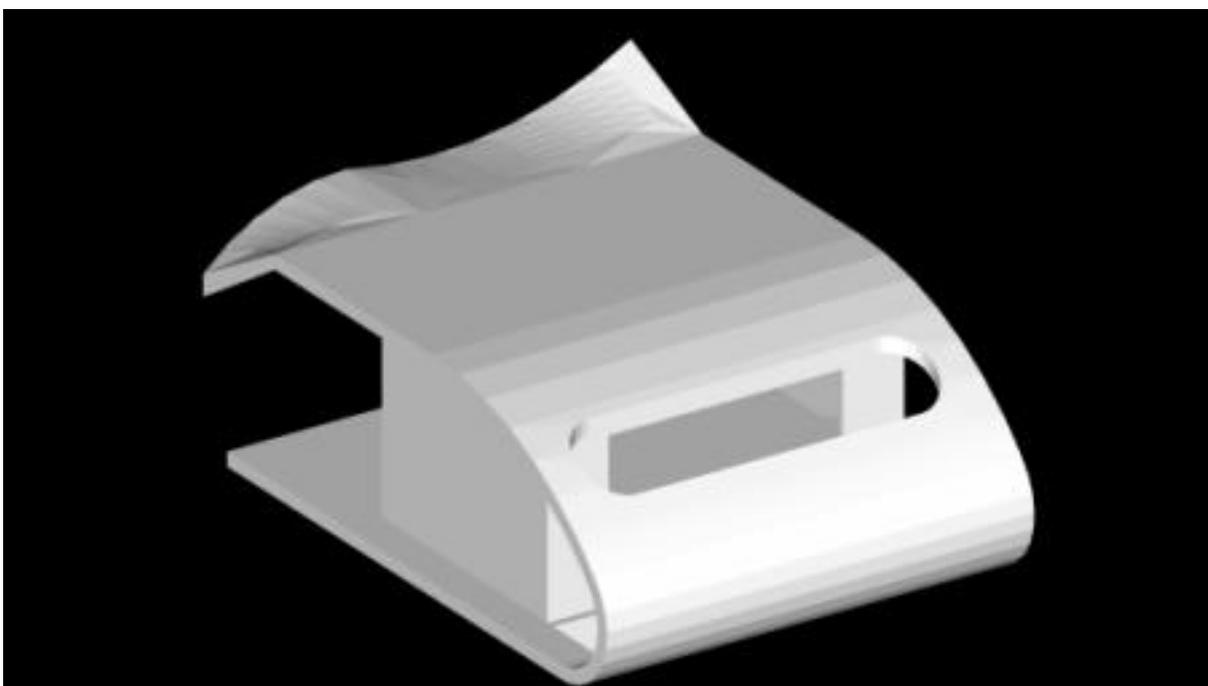
VISTA NORDESTE – MODELO BZ (AUTOCAD > ZPRINT)



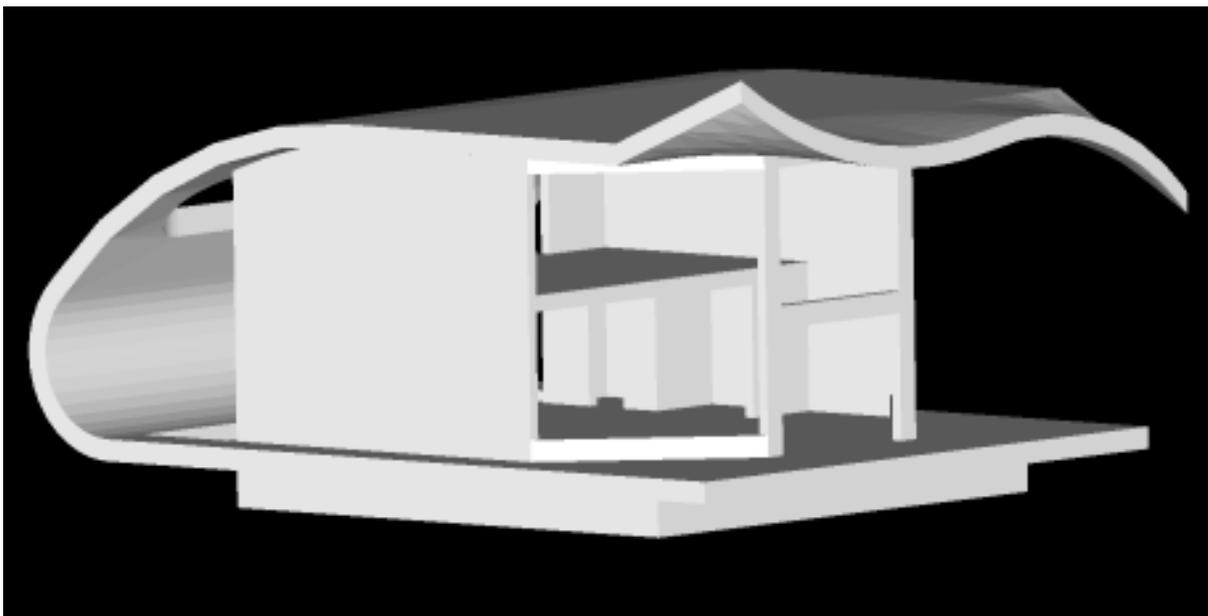
VISTA NOROESTE – MODELO BZ (AUTOCAD > ZPRINT)



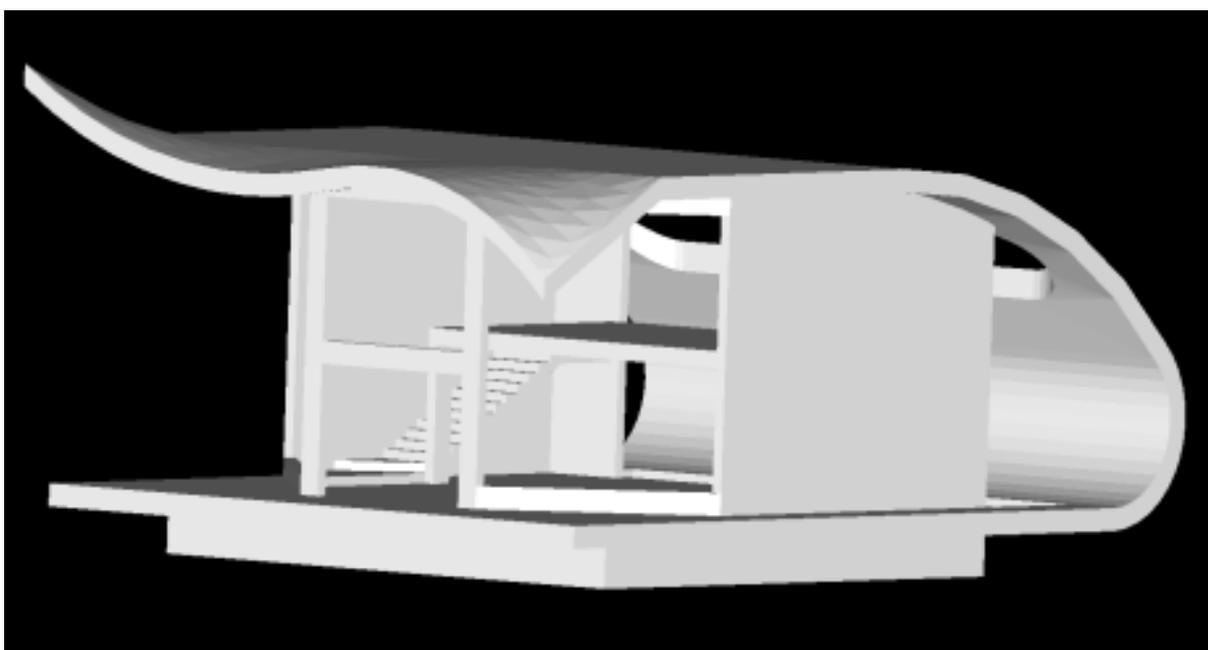
VISTA SUDESTE – MODELO BZ (AUTOCAD > ZPRINT)



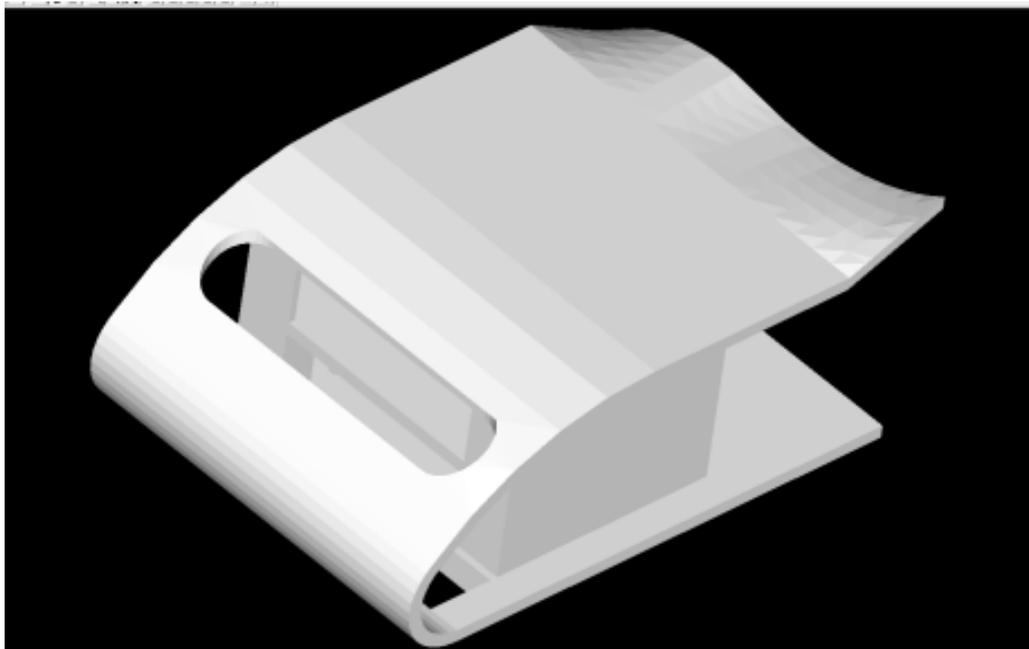
VISTA SUDOESTE – MODELO BZ (AUTOCAD > ZPRINT)



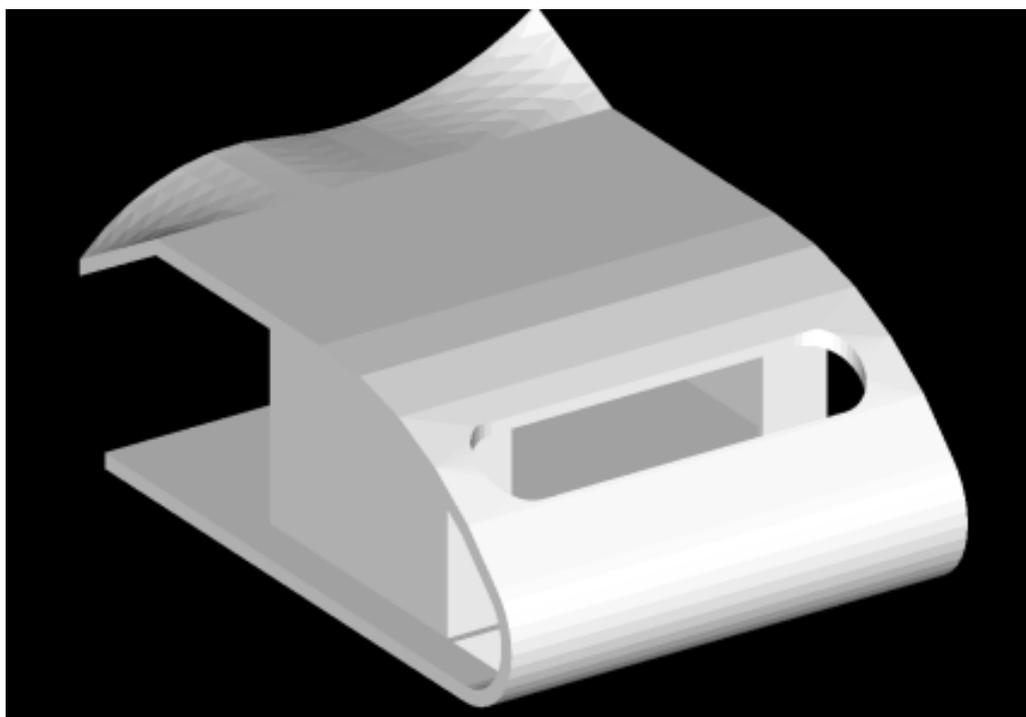
VISTA NORDESTE – MODELO CZ (FORMZ > ZPRINT)



VISTA NOROESTE – MODELO CZ (FORMZ > ZPRINT)



VISTA SUDESTE – MODELO CZ (FORMZ > ZPRINT)



VISTA SUDOESTE – MODELO CZ (FORMZ > ZPRINT)

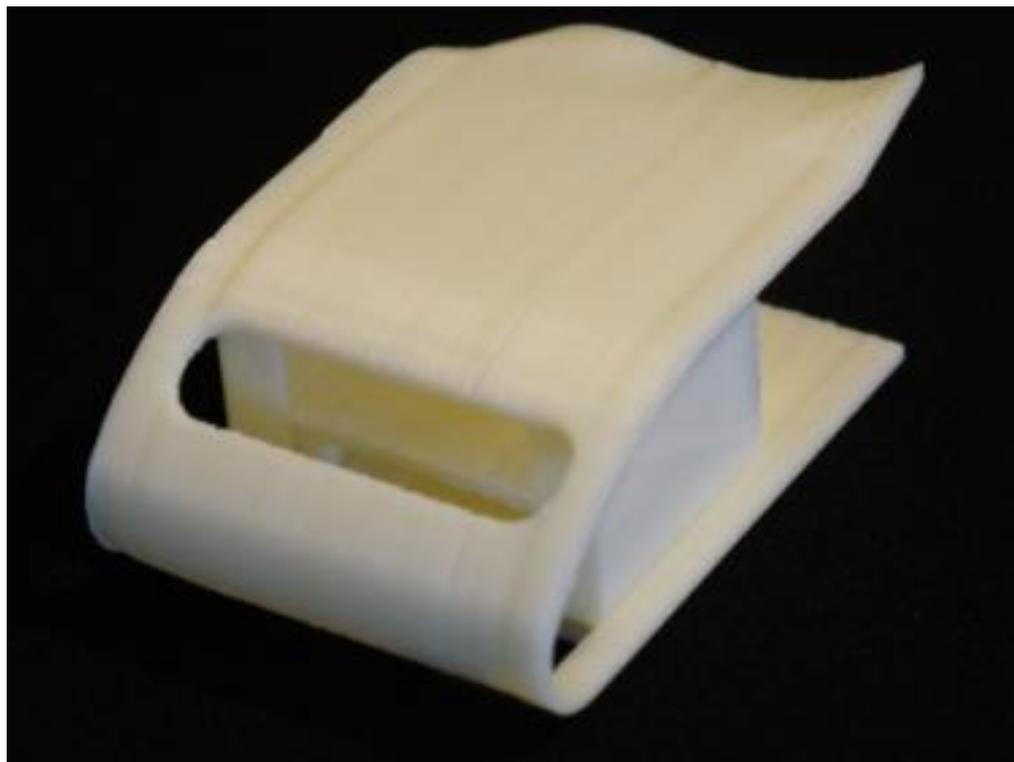
APÊNDICE D - FOTOS DOS PROTÓTIPOS RÁPIDOS



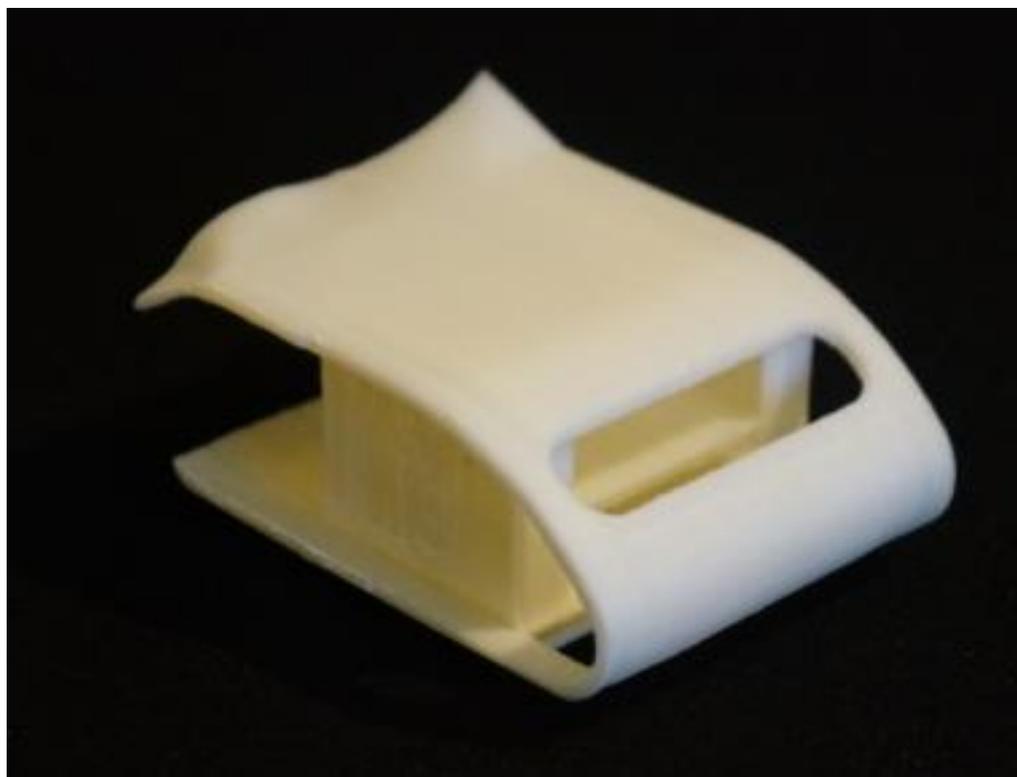
VISTA NORDESTE – FOTO PROTÓTIPO AX (REVIT > THING-O-MATIC)



VISTA NOROESTE – FOTO PROTÓTIPO AX (REVIT > THING-O-MATIC)



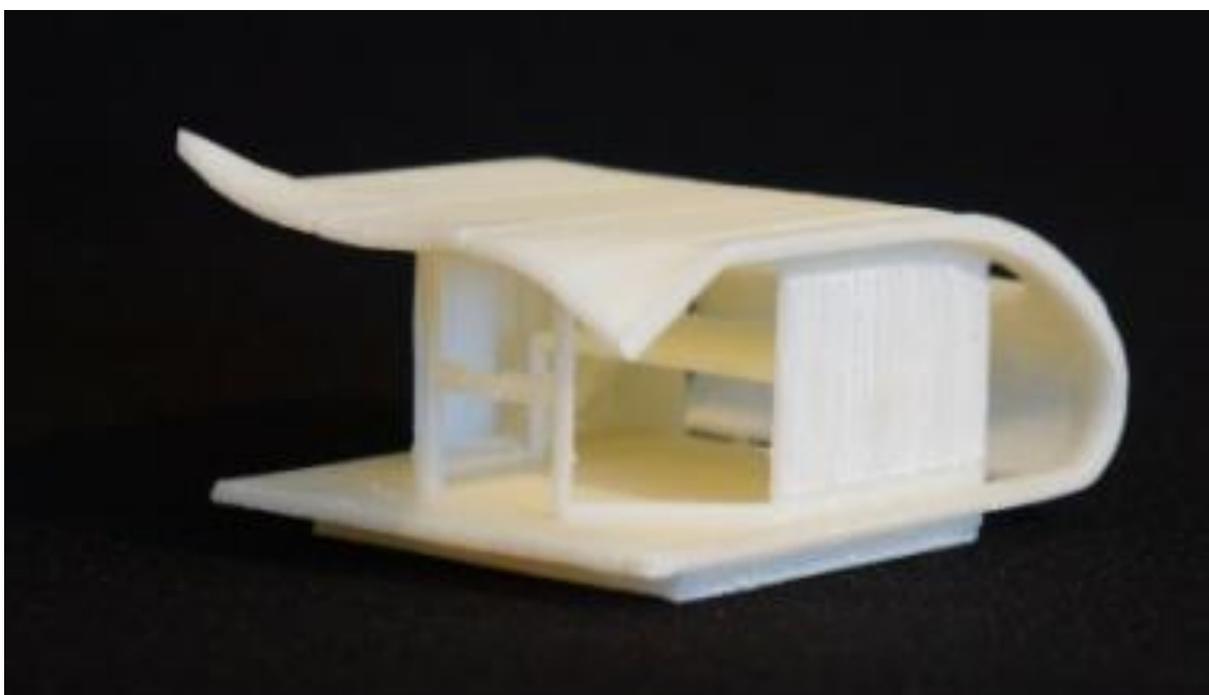
VISTA SUDESTE – FOTO PROTÓTIPO AX (REVIT > THING-O-MATIC)



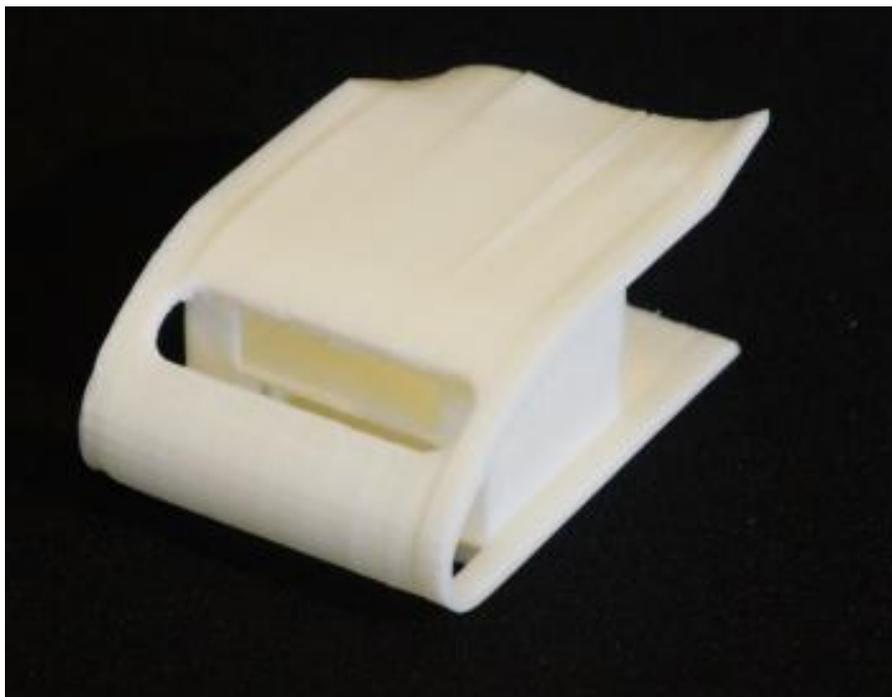
VISTA SUDOESTE – FOTO PROTÓTIPO AX (REVIT > THING-O-MATIC)



VISTA NORDESTE – FOTO PROTÓTIPO BX (AUTOCAD > THING-O-MATIC)



VISTA NOROESTE – FOTO PROTÓTIPO BX (AUTOCAD > THING-O-MATIC)



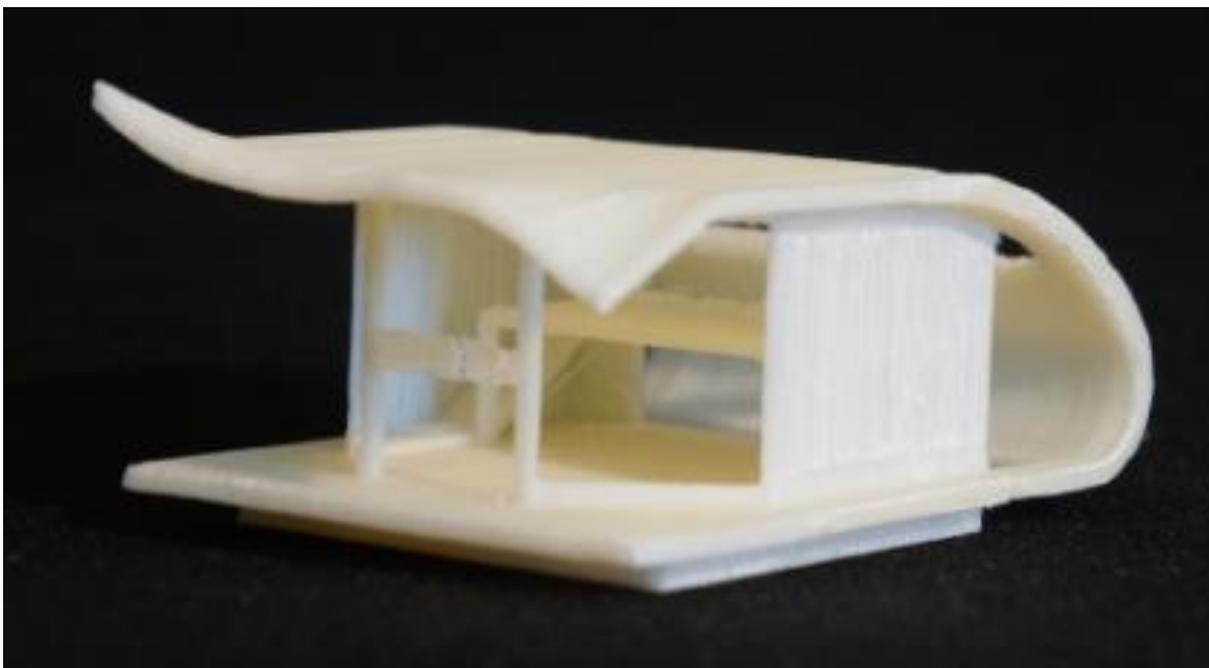
VISTA SUDESTE – FOTO PROTÓTIPO BX (AUTOCAD > THING-O-MATIC)



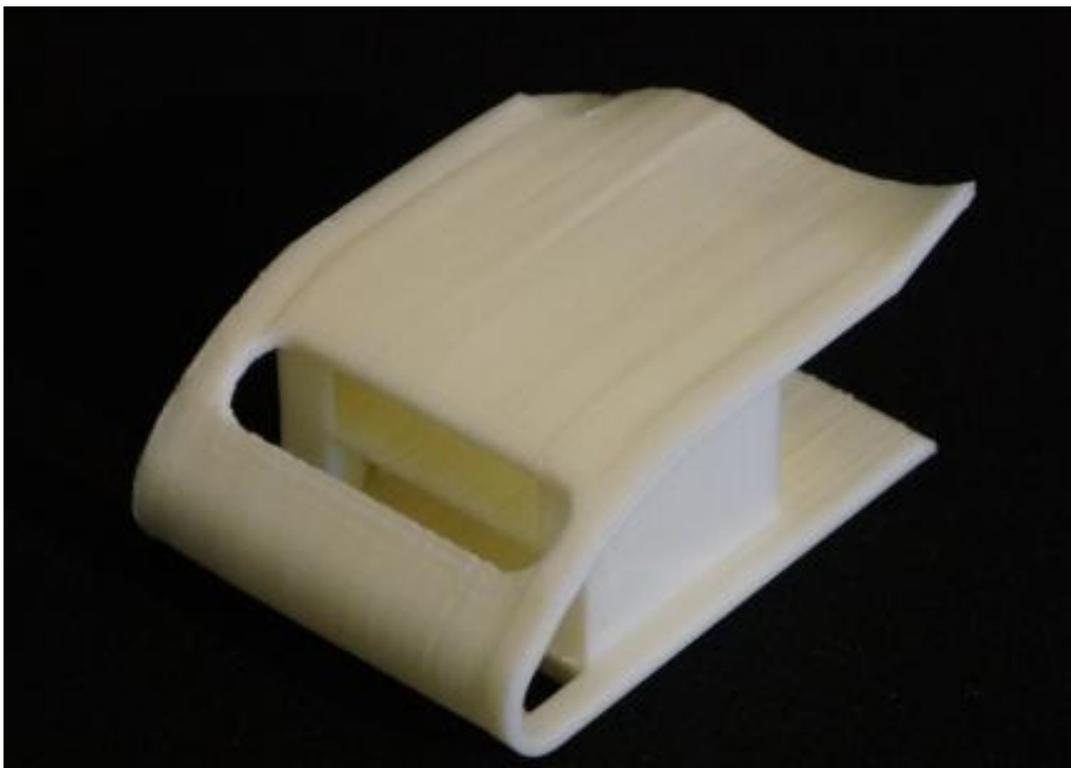
VISTA SUDOESTE – FOTO PROTÓTIPO BX (AUTOCAD > THING-O-MATIC)



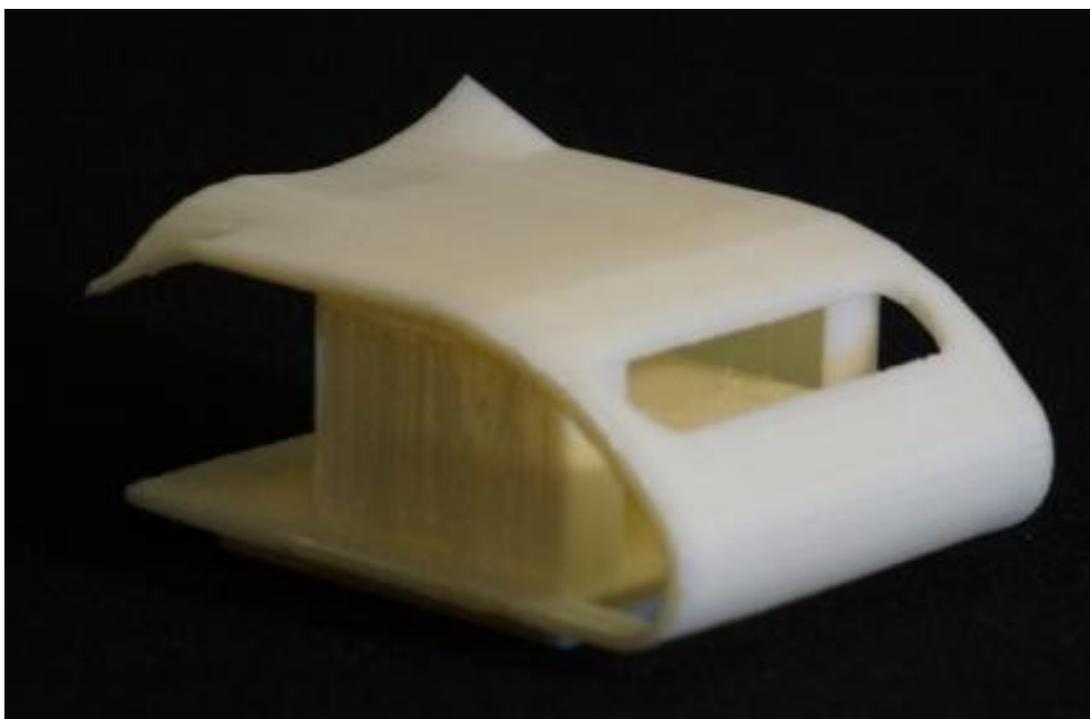
VISTA NORDESTE – FOTO PROTÓTIPO CX (FORMZ > THING-O-MATIC)



VISTA NOROESTE – FOTO PROTÓTIPO CX (FORMZ > THING-O-MATIC)



VISTA SUDESTE – FOTO PROTÓTIPO CX (FORMZ > THING-O-MATIC)



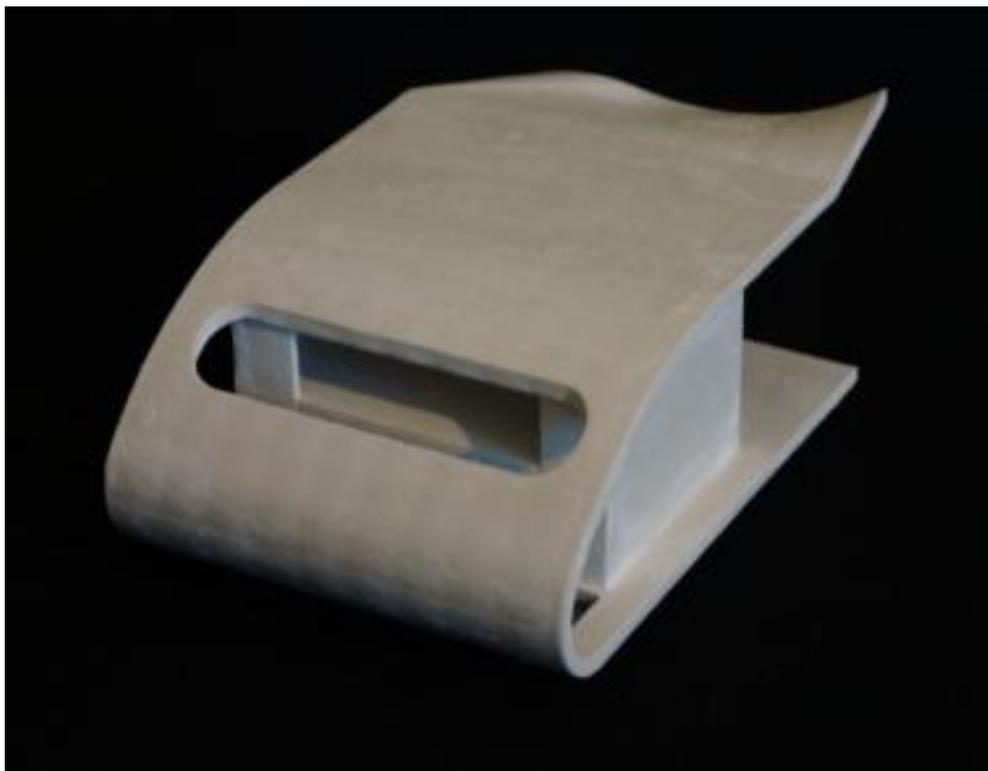
VISTA SUDOESTE – FOTO PROTÓTIPO CX (FORMZ > THING-O-MATIC)



VISTA NORDESTE – FOTO PROTÓTIPO AZ (REVIT > ZPRINTER)



VISTA NOROESTE – FOTO PROTÓTIPO AZ (REVIT > ZPRINTER)



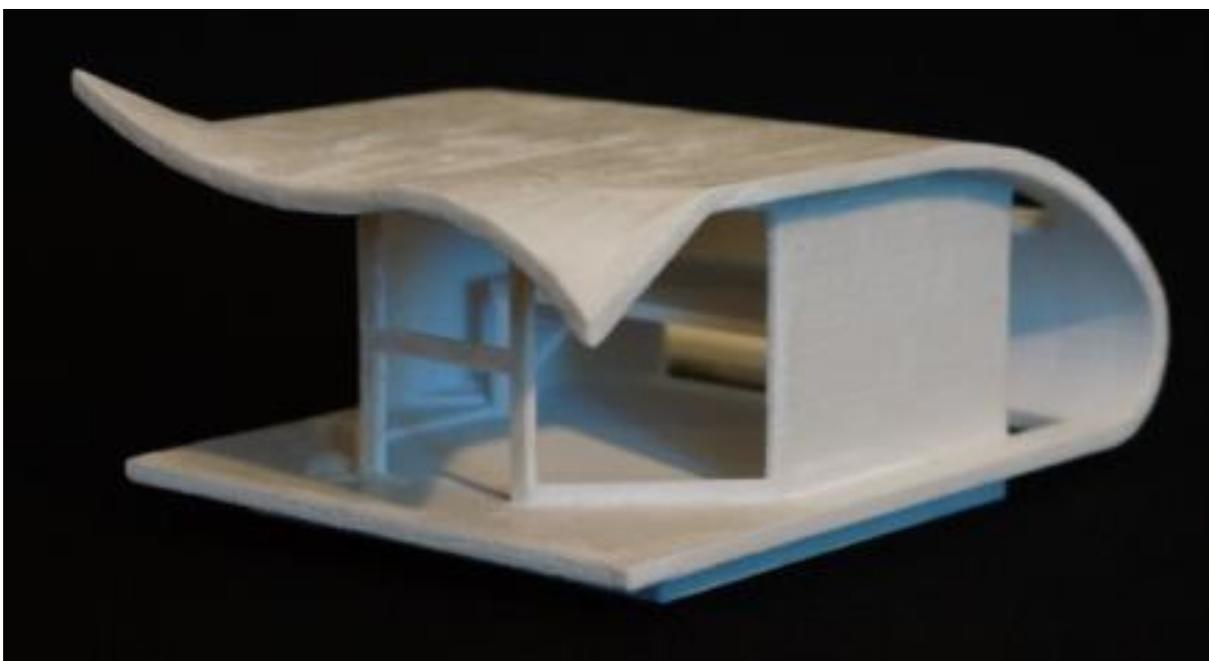
VISTA SUDESTE – FOTO PROTÓTIPO AZ (REVIT > ZPRINTER)



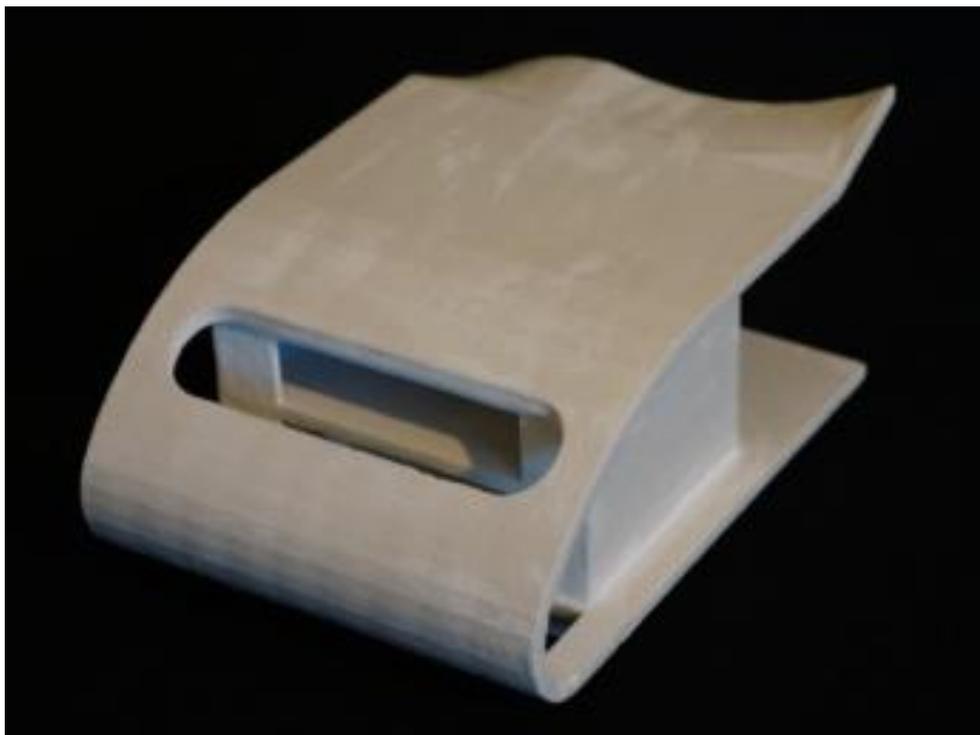
VISTA SUDOESTE – FOTO PROTÓTIPO AZ (REVIT > ZPRINTER)



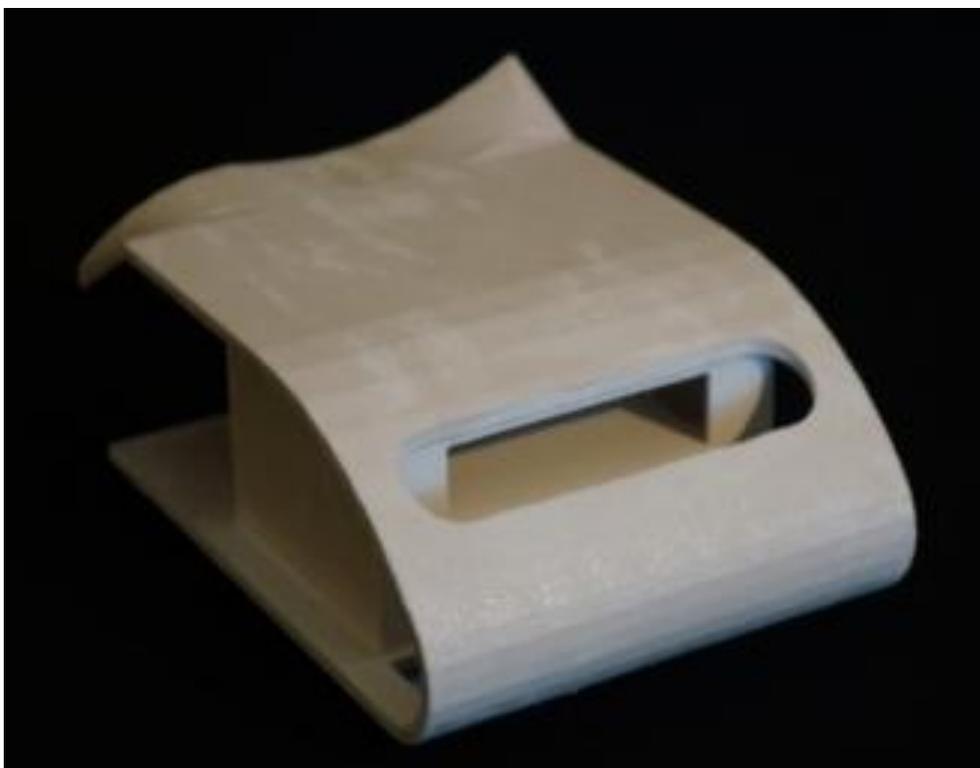
VISTA NORDESTE – FOTO PROTÓTIPO BZ (AUTOCAD > ZPRINTER)



VISTA NOROESTE – FOTO PROTÓTIPO BZ (AUTOCAD > ZPRINTER)



VISTA SUDESTE – FOTO PROTÓTIPO BZ (AUTOCAD > ZPRINTER)



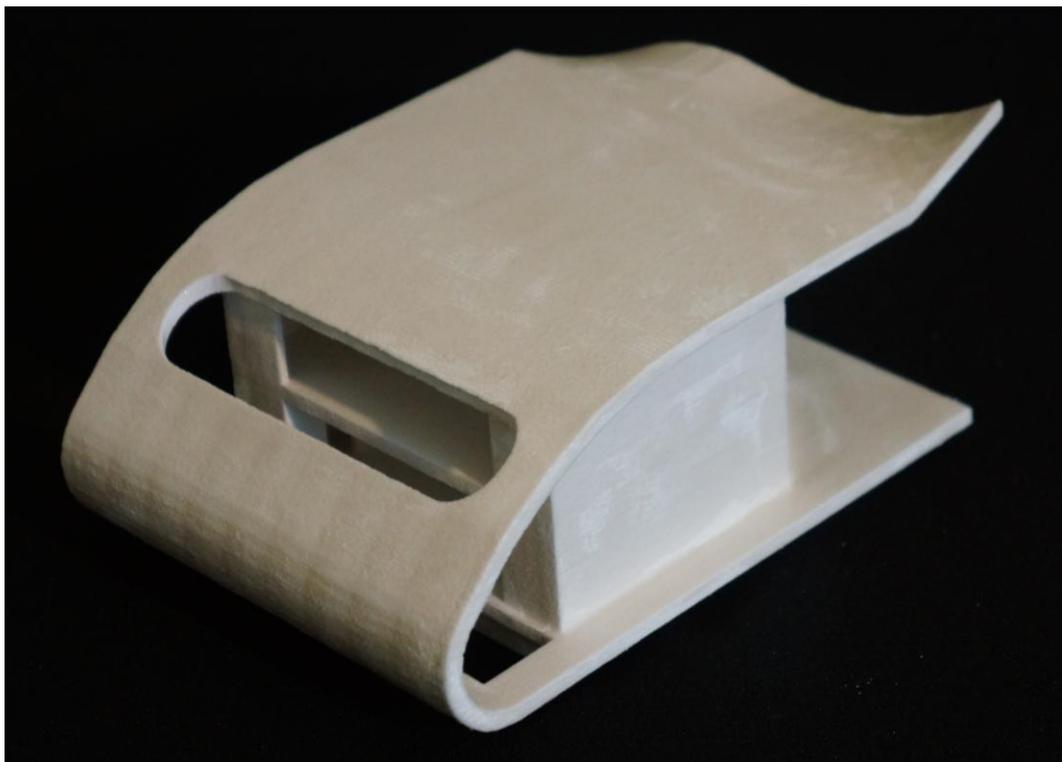
VISTA SUDOESTE – FOTO PROTÓTIPO BZ (AUTOCAD > ZPRINTER)



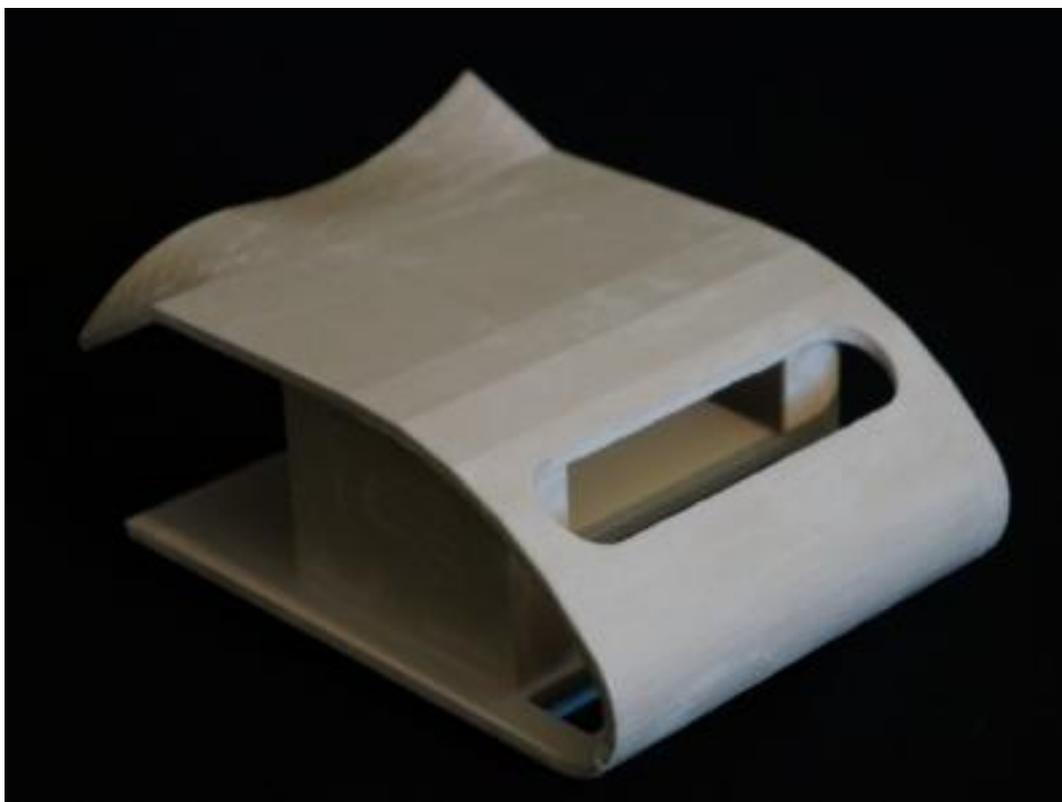
VISTA NORDESTE – FOTO PROTÓTIPO CZ (FORMZ > ZPRINTER)



VISTA NOROESTE – FOTO PROTÓTIPO CZ (FORMZ > ZPRINTER)



VISTA SUDESTE – FOTO PROTÓTIPO CZ (FORMZ > ZPRINTER)



VISTA SUDOESTE – FOTO PROTÓTIPO CZ (FORMZ > ZPRINTER)

APÊNDICE E - IMAGENS DOS ARQUIVOS STL DOS MODELOS CAD IMPORTADOS NO SOFTWARE FORMZ

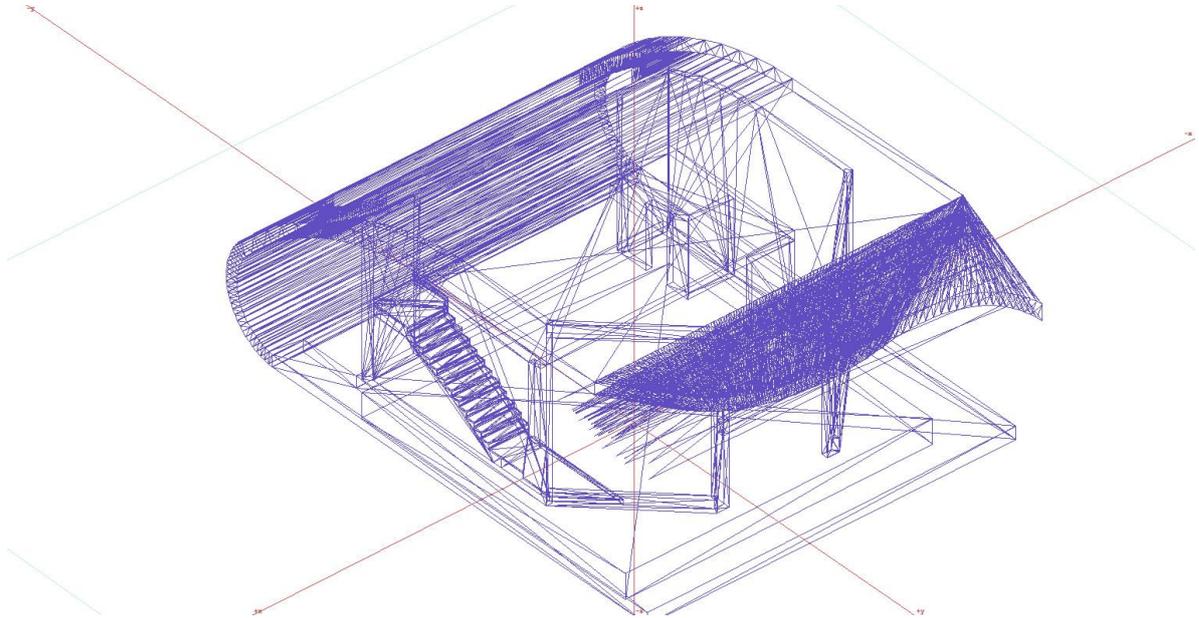


IMAGEM NO MODO *WIREFRAME* DE VISUALIZAÇÃO DO ARQUIVO STL DO
MODELO CAD A (REVIT) IMPORTADO NO SOFTWARE FORMZ

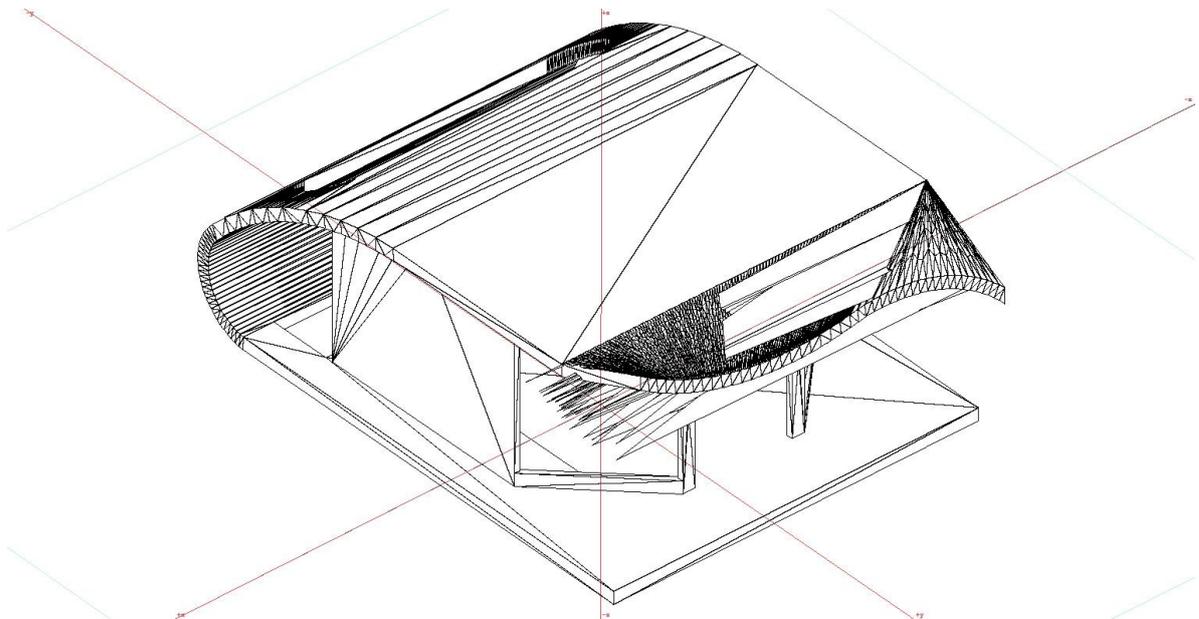


IMAGEM NO MODO *HIDDENLINES* DE VISUALIZAÇÃO DO ARQUIVO STL DO
MODELO CAD A (REVIT) IMPORTADO NO SOFTWARE FORMZ

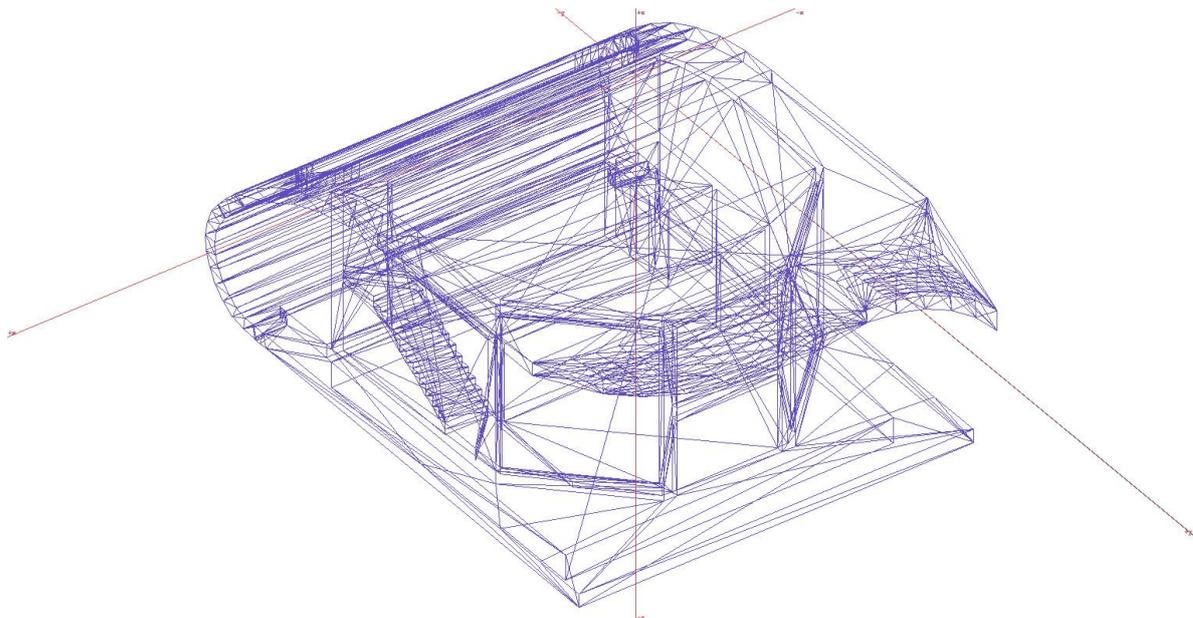


IMAGEM NO MODO *WIREFRAME* DE VISUALIZAÇÃO DO ARQUIVO STL DO MODELO CAD B (AUTOCAD) IMPORTADO NO SOFTWARE FORMZ

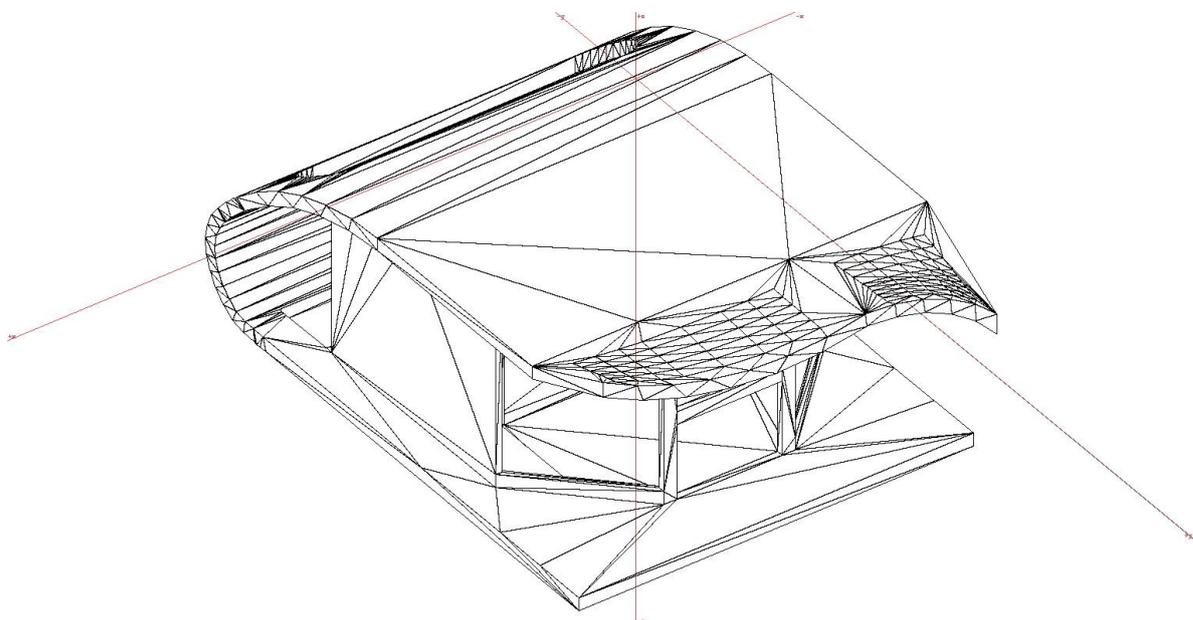


IMAGEM NO MODO *HIDDENLINES* DE VISUALIZAÇÃO DO ARQUIVO STL DO MODELO CAD B (AUTOCAD) IMPORTADO NO SOFTWARE FORMZ

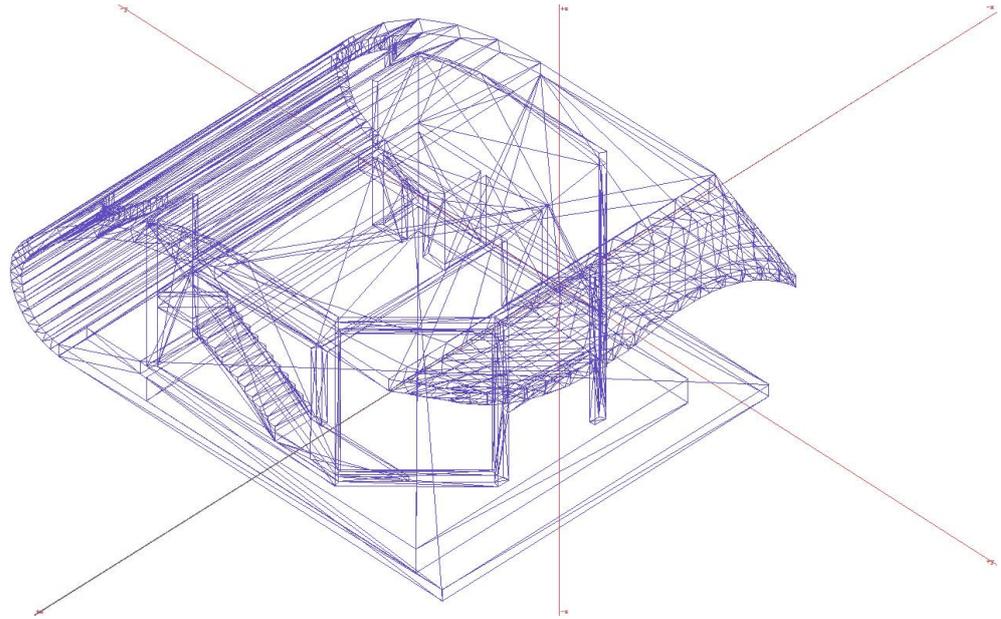


IMAGEM NO MODO *WIREFRAME* DE VISUALIZAÇÃO DO ARQUIVO STL DO MODELO CAD C (FORMZ) IMPORTADO NO SOFTWARE FORMZ

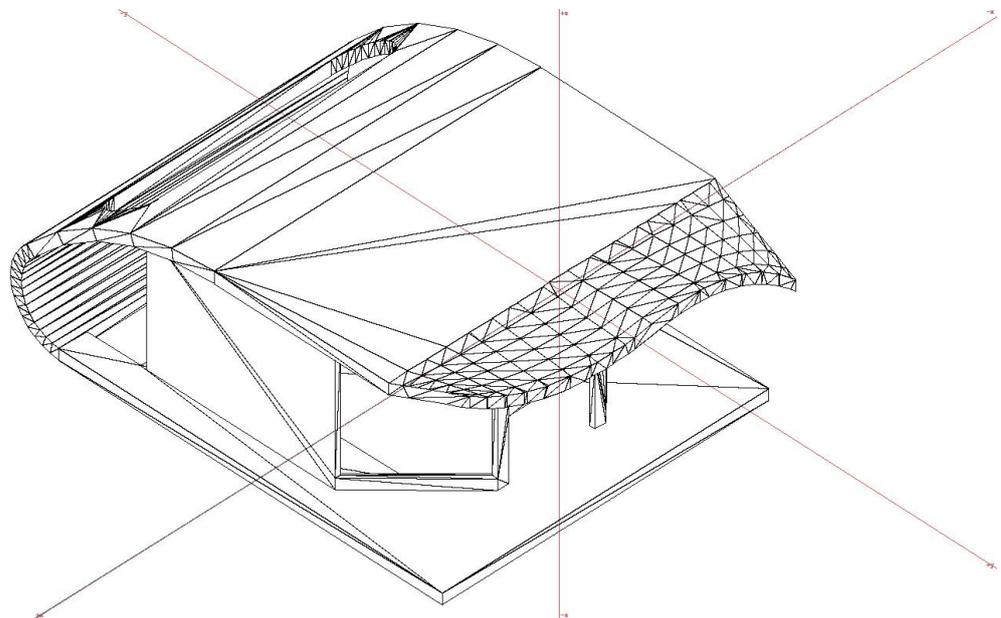


IMAGEM NO MODO *HIDDENLINES* DE VISUALIZAÇÃO DO ARQUIVO STL DO MODELO CAD C (FORMZ) IMPORTADO NO SOFTWARE FORMZ

