

PRODUÇÃO DIGITAL DE MAQUETES ARQUITETÔNICAS: UM ESTUDO EXPLORATÓRIO.

DIGITAL FABRICATION OF ARCHITECTURAL MODELS: AN EXPLORATORY STUDY.

PINHEIRO, Erica, Mestre em Engenharia Civil, Departamento de Arquitetura e Construção, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, erica.parq@uol.com.br

CELANI, Gabriela, Ph.D., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brazil celani@fec.unicamp.br

1 ABSTRACT

The present work is an exploratory study about the digital fabrication of architectural models. It started with a literature review, with the aim of getting in contact with the new digital methods for making models and prototypes, from modeling software to rapid prototyping equipment, processes, materials and applications. Still in this initial study the work of two well-known architects, Frank Gehry and Norman Foster, who use rapid prototyping techniques in their design process, was analyzed. From this part of the research it was possible to conclude that the different approaches that architects have to the design process is reflected in the way they use digital techniques for making their models. The second part of the research consisted of a series of experiments with the objective of illustrating the digital production of architectural models. For these experiments, Frank Gehry's Guggenheim Museum in Bilbao was chosen as a fixed variable for the production of models, due to its geometric complexity, which allowed to push the use of the available rapid prototyping equipment to their limits. Only the equipment available at FEC-UNICAMP's (Laboratório de Prototipagem para Arquitetura e Construção - LAPAC) and CENPRA's (Laboratório de Prototipagem Rápida do Centro de Pesquisas Renato Archer) laboratories were used. They consisted of a 3d printer, a fusion deposition modeller (FDM) machine, and a laser cutter. Different techniques and materials were tested in these machines, with the objective of evaluating the quality and economic viability of the resulting models. The results showed that the digital production of architectural models is viable for use in Brazilian architecture schools, in terms of procedures, cost and availability of materials, time spent and quality of the models. Finally, a manual with recommendations and tips was produced, with the aim of helping students build their own models using rapid prototyping equipment. We hope that the results of this research will help guiding the incorporation of these techniques in architecture education and practice in Brazil.

2 RESUMO

Este trabalho consiste em um estudo exploratório sobre a produção digital de maquetes arquitetônicas. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica com a finalidade de conhecer os novos métodos de produção digital de maquetes, incluindo software de modelagem e equipamentos de prototipagem rápida. Nesse estudo inicial, além de explorar os principais equipamentos, processos, aplicações e materiais, identificou-se dois arquitetos renomados que fazem uso dessa tecnologia nos seus processos de projeto: Frank Gehry e Norman Foster. Deste estudo verificou-se processos distintos de projeto e diferentes abordagens sobre a utilização dessas ferramentas, o que motivou a realização de experimentos para exemplificar como produzir digitalmente maquetes arquitetônicas. O Museu Guggenheim de Bilbao, de Frank Gehry, foi escolhido como variável fixa para realização dos experimentos de produção digital de maquetes, por ser um modelo de grande complexidade, permitindo testar os limites dos equipamentos de prototipagem rápida disponíveis no Laboratório de Prototipagem para Arquitetura e Construção (LAPAC) da FEC - Unicamp e no Centro de Pesquisas Renato Archer (CenPRA). Além disso, foram testadas diferentes técnicas e materiais, inclusive materiais alternativos, com o objetivo de viabilização econômica. Os resultados comprovaram que o processo de produção digital de maquetes arquitetônicas é viável em termos de procedimentos, de custo, de materiais disponíveis no mercado, qualidade das maquetes produzidas e rapidez na execução. A partir das conclusões obtidas nos experimentos realizados foi elaborado um caderno de recomendações para a confecção de maquetes que será utilizado pelos usuários do LAPAC e que servirá como importante ferramenta de auxílio para os iniciantes na produção digital de maquetes arquitetônicas. Espera-se que os resultados desta pesquisa possam auxiliar a estabelecer diretrizes para a incorporação dessas técnicas e equipamentos em disciplinas de projeto e na prática de arquitetura.

3 INTRODUÇÃO

Arquitetos sempre buscaram diferentes meios para expressar seus projetos. Tradicionalmente, desenhos e maquetes manuais, sempre foram os meios mais utilizados no processo de exploração de soluções.

O modelo físico, por séculos, serviu como intermediário entre projetos complexos e a prática construtiva. Sass (2006g) cita que arquitetos da Renascença usavam modelos físicos para descrever as formas dos edifícios e suas técnicas construtivas. A execução destes modelos por meio de técnicas tradicionais de maquetaria sempre foi um exaustivo e demorado processo manual de translação do desenho

para a representação física, com materiais difíceis de serem manipulados e com resultados nem sempre precisos.

Atualmente, inúmeras ferramentas CAD (Computer Aided Design) possibilitam aos arquitetos criar e representar virtualmente suas formas por meio de maquetes eletrônicas e sofisticadas produções fotorrealísticas. Isso se deve, entre outras coisas, à facilidade de desenvolvimento de modelos 3D e à grande disponibilidade de recursos de *rendering*. Esses recursos tridimensionais do CAD são vantajosos porque permitem perceber conflitos que seriam difíceis de prever em desenhos bidimensionais. Porém, se por um lado o uso da modelagem geométrica tridimensional tem aspectos positivos, por outro, apresenta aspectos negativos, como distorções de perspectiva, o que torna a percepção do espaço diferente da realidade.

Toda essa facilidade de visualização oferecida pelas ferramentas CAD, contudo, tem ocasionado a redução do uso da maquete física, que é mais trabalhosa e leva muito mais tempo para ser construída. Este é um fato preocupante porque certas características da maquete física, como a manipulação direta de diferentes materiais e a interação entre as pessoas envolvidas no projeto, não podem ser substituídas por uma modelagem geométrica tridimensional.

Hoje, a tecnologia permite que se aproveitem as características positivas dos modelos geométricos tridimensionais e das maquetes físicas por meio de um processo integrado: a produção automatizada de maquetes arquitetônicas.

Este processo utiliza como ferramenta a tecnologia da prototipagem rápida (PR), que permite a produção automatizada, rápida e detalhada de modelos físicos, analíticos ou representativos, e componentes construtivos a partir modelos geométricos tridimensionais, servindo de ponte entre a representação/produção física e computacional do projeto.

Em alguns países, em especial nos Estados Unidos, são comuns as discussões e pesquisas no campo da tecnologia CAD/CAM (software e produção) em escolas e centros de pesquisa em arquitetura, como a School of Architecture and Planning do MIT e a Graduate School of Design de Harvard.

No Brasil, a utilização da prototipagem rápida pode ser considerada ainda incipiente e restrita ao desenvolvimento de peças para a indústria mecânica. Na área educacional a prototipagem rápida se restringe às escolas de engenharia mecânica, desenho industrial e ao estudo da paleontologia. Outra aplicação da prototipagem rápida no Brasil tem se dado na área médico-odontológica, no

desenvolvimento de próteses para cirurgias de reconstrução bucomaxilofacial (SILVA et al, 2006).

O uso restrito da PR no Brasil se deve principalmente ao seu elevado custo, pois ainda dependemos de maquinário e material de consumo importados, o que inviabiliza, do ponto de vista econômico, o uso dessa técnica para a produção de modelos e maquetes que poderiam ser confeccionados por meios artesanais com a mesma precisão, porém a custos mais baixos. As aplicações nas áreas citadas acima só se justificam porque trazem ganhos econômicos superiores aos gastos com a PR ou porque permitem realizar procedimentos médicos previamente testados.

Na arquitetura, no entanto, o custo de uma maquete produzida por PR só se justifica se houver a necessidade de produção de formas muito complexas, impraticáveis de se produzir por técnicas tradicionais. Por esse motivo, ainda é praticamente inexistente o uso da PR voltado à arquitetura no Brasil. Outro provável fator é a inexistência de laboratórios de PR para arquitetura e a falta de experiência no desenvolvimento de maquetes e na incorporação da técnica no processo de projeto em arquitetura (CELANI et al, 2007).

Tendo em vista todos estes fatores, os quais justificam esta pesquisa, o presente trabalho objetiva realizar um estudo exploratório sobre a produção digital de maquetes, para conhecer e testar os limites de cada equipamento na execução de formas de grande complexidade, visando o estabelecimento de diretrizes para a viabilização (em termos de procedimentos, de custo, de materiais disponíveis no mercado, técnicas, qualidade das maquetes produzidas, rapidez de execução, etc.) desse tipo de equipamento em disciplinas de projeto e na prática de arquitetura.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 PRINCIPAIS PROCESSOS ATUAIS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Há controvérsias sobre quais técnicas são efetivamente de PR e quais não são. Jorge Lopes da Silva, pesquisador do Centro de Pesquisas Renato Archer (CenPRA), sugere que protótipos rápidos são obtidos somente por deposição, ou seja, por processos com o Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM - Fused deposition modeling), Estereolitografia (SL - Stereolithography), Sinterização Seletiva a Laser (SLS - Selective Laser Sintering), Impressão tridimensional (DP) e etc. (SILVA et al, 2006). Porém, segundo Sass (2006g) e seu grupo de pesquisa no MIT, o Digital Design Fabrication, a PR pode ser classificada em três tipos de

máquinas: as cortadoras, as subtrativas e as aditivas. O primeiro grupo, o das cortadoras, trabalha com equipamentos tais como as cortadoras a laser, cortadoras a jato de água e cortadoras de vinil que cortam peças para serem posteriormente montadas.

Segundo Sass (2006g) as cortadoras requerem descrições em 2D para construir modelos 3D. Desenhos em CAD são planificados já prevendo possíveis encaixes, de acordo com o material em que vão ser construídos e automaticamente transportados para as cortadoras que cortam o material e por meio da montagem dessas partes pode-se obter o modelo físico 3D. As cortadoras a laser cortam diversos materiais como madeira, papelão, papel cartão, acrílico e plástico em diferentes espessuras (figura 1).

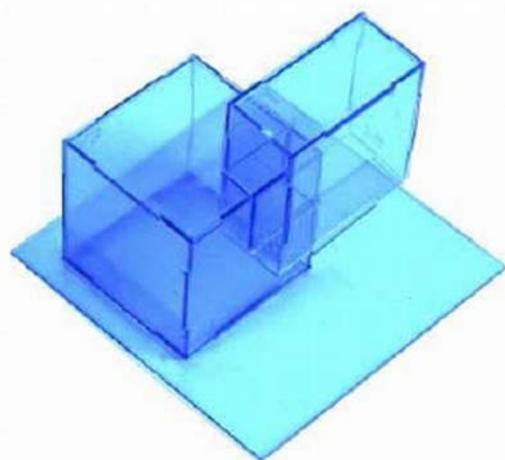


Figura 1: Exemplo de objeto feito com cortadora a laser (SASS, 2006g)

As cortadoras a jato de água também cortam com rapidez e precisão uma grande variedade de materiais como metais, policarbonato, pedras, vidro e borracha (figura 2).



Figura 2: Exemplo de objeto metálico cortado com a cortadora a jato de água (KILIAN, 2003)

A cortadora de vinil como o próprio nome já sugere corta materiais finos como papel, vinil, acetato e papel alumínio (figura 3), por meio de uma pequena lâmina.



Figura 3: Exemplo de objeto feito com a cortadora de vinil (DDFG, 2006a)

O segundo grupo, o das máquinas que operam com processos subtrativos, trabalham a partir de uma peça “bruta”, esculpindo e eliminando partes da peça até deixá-la com a forma desejada. Nesse grupo podemos destacar as máquinas fresadoras (milling device). Alguns exemplos de aplicações de máquinas fresadoras como a Modela Miller e a Denford Miller podem ser observados nas figuras 4 e 5.



Figura 4: Exemplos de utilização da Modela (DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP, 2006c)

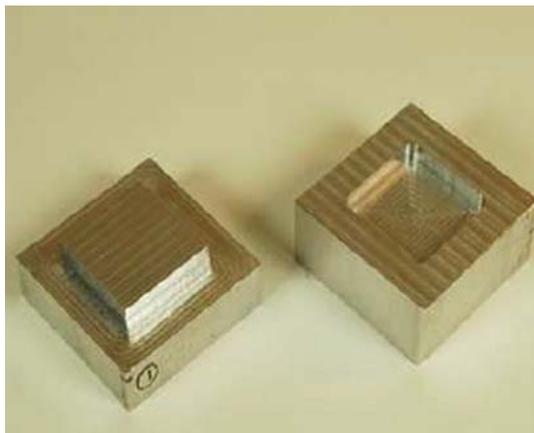


Figura 5: Exemplos de utilização da Denford Miller (DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP, 2006e)

Finalmente, o terceiro grupo, o das máquinas aditivas, produzem o objeto desejado por meio da deposição de material camada por camada. Essas máquinas também conhecidas como impressoras 3D podem variar enormemente em termos de tecnologia, insumos utilizados e qualidade dos protótipos produzidos. Os tipos mais utilizados na área de arquitetura são o sistema de estereolitografia (SL), o sistema FDM (*fusion deposition modeler*) e as impressoras a pó.

De acordo com Jacobs (1992) a estereolitografia (SL, Stereolithography) é um processo pioneiro que constrói modelos tridimensionais a partir de polímeros líquidos sensíveis à luz, que se solidificam quando expostos à radiação de um feixe de laser ultravioleta (figura 6).

O Sistema FDM ou modelagem por deposição de material fundido, tem sido comercializado desde 1991. De acordo com Saura (2003) é o segundo mais usado processo de PR e baseia-se num filamento plástico (ABS, policarbonato, poliéster, etc) que ao ser desenrolado de uma bobina fornece o material para um bocal de extrusão. Este bocal é aquecido para derreter o filamento plástico e tem um mecanismo que permite que o fluxo de plástico derretido seja depositado camada a camada formando o objeto (figura 7).

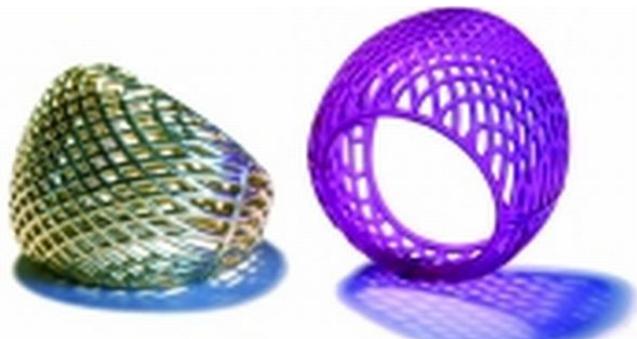


Figura 6: Protótipo de jóia confeccionado em SL (3D SYSTEMS, 2006a)

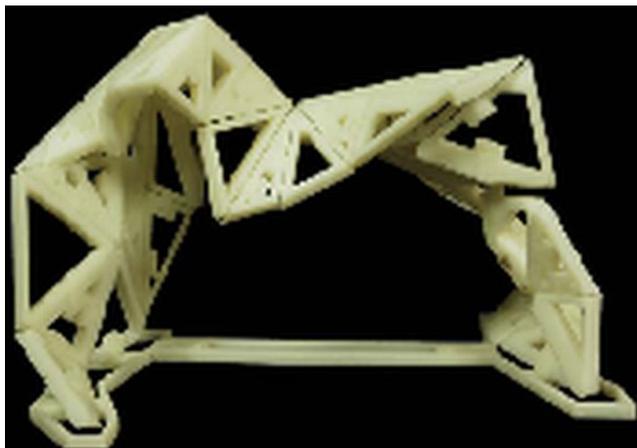


Figura 7: Exemplo de objeto feito em FDM (SASS, 2006g)

O sistema de impressão tridimensional (3D Printer) possui como princípio a aglutinação de material pulverulento pela ação de um líquido aglutinante expelido em gotículas por um cabeçote tipo "jato de tinta", muito parecido com os utilizados em impressoras comuns. O jato de aglutinante gerado pelo cabeçote é aspergido sobre uma camada de pó depositado sobre uma plataforma que se movimenta na direção Z. Um rolo é utilizado para depositar novas camadas de material e compactar uma camada sobre a outra e assim sucessivamente, sendo capaz de reproduzir objetos altamente detalhados como mostra a figura 8.



Figura 8: Exemplo de objeto feito em 3DP (DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP, 2006f)

Sabendo das restrições e benefícios que cada máquina de PR pode apresentar, pesquisadores do Digital Design Fabrication Group (MIT) têm experimentado também a utilização conjunta das técnicas de PR para a construção de modelos arquitetônicos, aproveitando o que há de melhor em cada técnica numa mesma peça (figura 9).

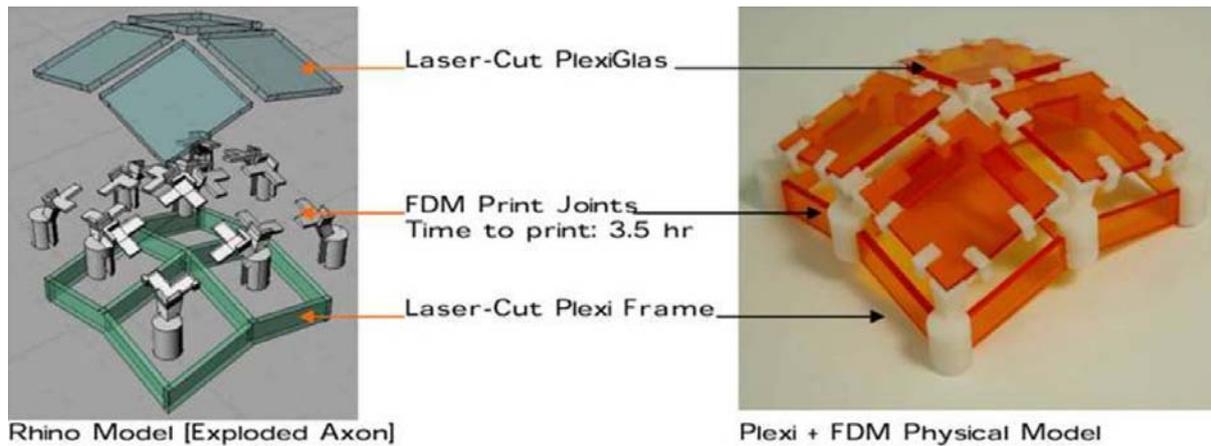


Figura 9: Exemplo de objeto feito com a cortadora a laser e com FDM (MIT, 2006c)

4.2 A INCORPORAÇÃO DA PR NO PROCESSO DE PROJETO DE ARQUITETURA

Segundo Mitchell e McCullough, (1995), a utilização da PR encurta o ciclo de produção e permite ao projetista experimentar formas, materiais e processos antes de tomar a decisão final. Este novo método de produção, com modelos virtuais e físicos, durante todo o processo de projeto e construção, diminui a necessidade de desenhos arquitetônicos como catalisadores da produção do projeto (SASS, 2006b). A utilização conjunta de formas de expressão gráficas, digitais e físicas (figura 10), serve de ponte entre a representação do projeto e a materialização do edifício como mostra o diagrama de Mitchell e McCullough (1995).

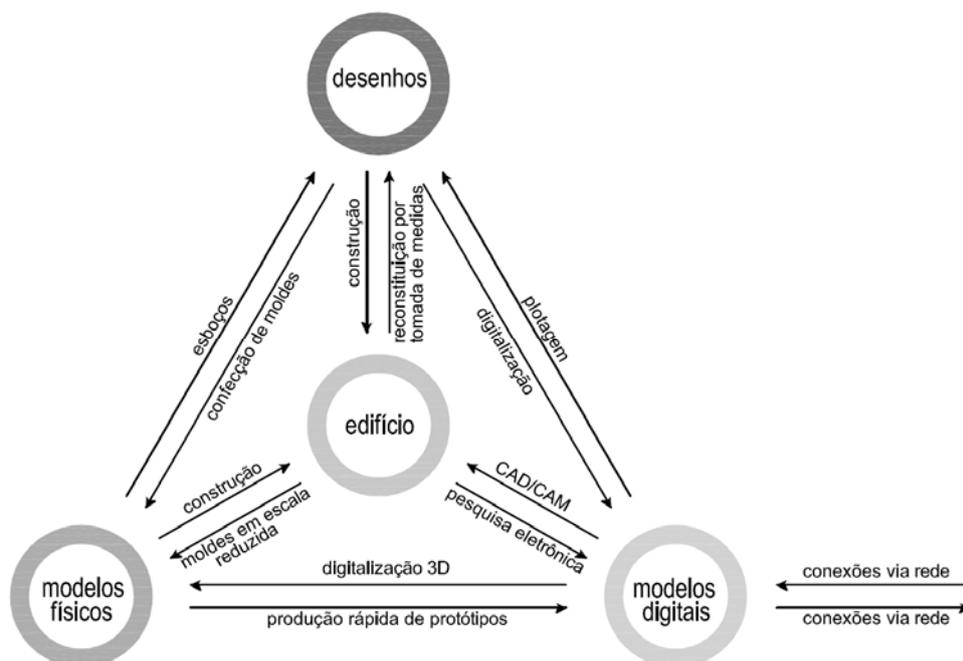


Figura 10: Formas de expressão utilizadas no processo de projeto - adaptada (Mithcell, McCullough, 1995)

Pesquisas acadêmicas como as de Sass (2006a), têm buscado a utilização da prototipagem rápida não apenas como instrumental na representação de projetos, mas como parte integrante do processo criativo. De acordo com Sass (2006g) a utilização da prototipagem rápida influencia as soluções encontradas desde as primeiras etapas e demonstra um processo de projeto situado entre o projeto conceitual e a construção no mundo real.

Ainda segundo Sass (2006a) um projeto requer que muitas representações de uma idéia sejam construídas como um processo. Uma importante questão é como facilitar a produção dessas representações para que os arquitetos possam fabricar rapidamente muitas idéias em forma física (figura 11).

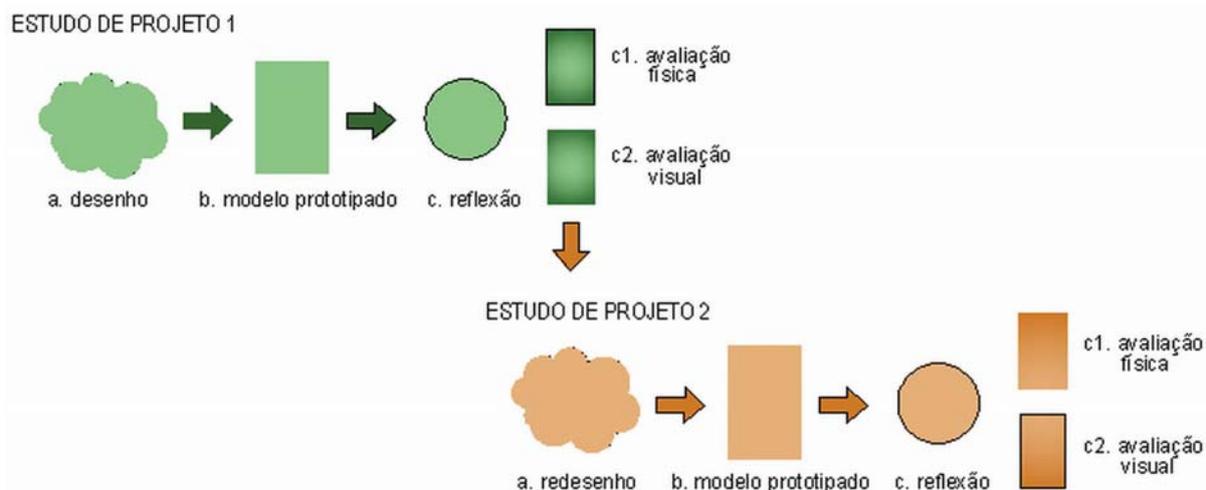


Figura 11: Processo de projeto esquematizado por Sass (SASS, 2006a)

Na prática, ainda são poucos os escritórios de arquitetura que adotam a prototipagem rápida como ferramenta auxiliar nas fases conceituais do processo de projeto. As aplicações mais notáveis destes equipamentos podem ser verificadas no trabalho de Frank Gehry, em Los Angeles, EUA e de Norman Foster, em Londres, Inglaterra.

4.3 OS MÉTODOS DE GEHRY E FOSTER

Frank Gehry e Norman Foster se utilizam de processos semelhantes àqueles acima esquematizados por Mitchell e McCullough (figura 10) e por Sass (figura 11). Larry Sass classifica os processos projetuais de Gehry e Foster respectivamente de pós e pré racional. No primeiro, o processo começa com a criação de formas esculturais irracionais, ou seja, sem nenhum tipo de preocupação com sua construtibilidade. Em seguida, sua equipe tenta racionalizar essas formas, utilizando para isso sofisticado programas de computador que as transformam em componentes industrializáveis. No caso de Norman Foster, o processo de projeto tem início com o desenvolvimento do sistema construtivo com um nível de detalhamento bastante

aprofundado. Em seguida, o arquiteto "monta" suas formas utilizando as peças pré-definidas da maneira como ele já sabe que elas poderão ser encaixadas. Sass compara os dois processos a brinquedos de montar infantis - o processo de Gehry se assemelharia ao Playmobil (figura 12), onde há um grande número de peças específicas, mas um pequeno número de possibilidades de projeto, enquanto o processo de Foster se assemelharia ao Lego (figura 13), em que há um número limitado de peças, mas elas podem formar um número muito grande de diferentes projetos.

Os diferentes processos de projeto observados nos arquitetos estudados podem ser relacionados aos métodos de projeto chamados de "*top-down*" e "*bottom-up*" por Mitchell em sua obra "*The Logic of Architecture : Design, Computation and Cognition*". De acordo com a classificação de Mitchell (1996), no processo de projeto de Foster (método *bottom-up* ou composição de baixo para cima) o arquiteto começa com elementos de forma e função conhecidas, ou seja, utiliza seu conhecimento das características formais e funcionais de elementos específicos de um vocabulário arquitetônico e trabalha essas formas por meio de operações e regras gramaticais de modo a estabelecer uma conexão funcional. No processo de projeto de Gehry (método *top-down* ou composição de cima para baixo) o arquiteto parte da concepção da forma e função do sistema como um todo, passando então a trabalhar nos detalhes. Neste sistema, ao contrário do processo de Foster, o arquiteto utiliza seu conhecimento de características formais e funcionais para sugerir escolhas e adaptações apropriadas de elementos de modo a atender a determinadas funções em um dado contexto.



Figura 12: Processo de Gehry - semelhante ao Playmobil (SASS, 2006f)

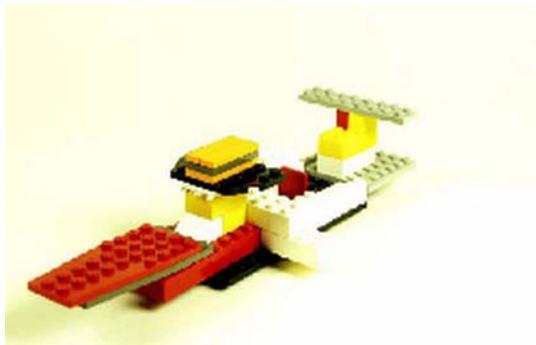


Figura 13: Processo de Foster - semelhante ao Lego (SASS, 2006f)

4.4 OS EXPERIMENTOS PARA PRODUÇÃO DIGITAL DE MAQUETES

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Prototipagem para Arquitetura e Construção (LAPAC) da FEC - Unicamp, utilizando uma Impressora 3D ZCorp e uma Cortadora Universal Laser Systems X-660 e no Centro de Pesquisas Renato Archer (CenPRA), utilizando um equipamento FDM. Tais experimentos foram divididos em várias etapas, as quais permeavam entre a modelagem geométrica tridimensional (protótipo virtual) e a produção de maquetes físicas.

A idéia inicial, ainda no projeto de pesquisa, era desenvolver experimentos que exemplificassem a produção automatizada de dois tipos de maquetes.

O primeiro tipo seriam as maquetes desenvolvidas nos processo de projeto conhecido como *top-down*, ou seja, quando o arquiteto inicia seu processo de projeto pelo volume geral do edifício, detalhando-o progressivamente até chegar aos elementos construtivos. Esse método é utilizado, por exemplo, pelo arquiteto Frank Gehry. O objetivo do experimento, neste caso, seria reproduzir uma volumetria simplificada de um edifício ou do seu plano de massas inicial.

O segundo tipo de maquete corresponderia às maquetes produzidas em um processo de projeto conhecido como *bottom-up*, no qual o arquiteto inicia seu processo projetual definindo os elementos básicos da construção. Esses elementos são então encaixados, montados de diferentes maneiras, até formar o edifício completo. Esse é o método utilizado, por exemplo, pelo arquiteto Norman Foster.

Contudo, durante o desenvolvimento dos exercícios concluiu-se que, experimentos para exemplificar esses dois métodos demandariam muito tempo e seriam muito extensos para um trabalho de mestrado.

Optou-se, então, por desenvolver, na etapa final desta pesquisa, uma maquete de um projeto desenvolvido pelo método *top-down* (de cima para baixo), uma vez que esse costuma ser o método mais utilizado nas etapas iniciais dos exercícios

projetuais desenvolvidos na maioria dos cursos de arquitetura. Determinou-se então, que o projeto a ser utilizado como exemplo nos exercícios de modelagem e produção de maquetes seria o Museu Guggenheim de Bilbao , de Frank Gehry, por se tratar de uma forma difícil de ser produzida pelos métodos tradicionais de maquetaria.

4.5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOMÉTRICO TRIDIMENSIONAL

O programa utilizado para a produção do modelo geométrico 3D do Museu Guggenheim de Bilbao foi definido em função da complexidade das formas e das informações que se tinha para a construção deste modelo. Sendo assim, o primeiro software a ser experimentado foi o SketchUp, que é um programa de modelagem tridimensional por superfícies, desenvolvido pela empresa @Last Software recém adquirida pelo Google. O slogan do software é “3D para todos”, isto se deve ao fato de se tratar de um programa bastante intuitivo, desenvolvido para etapas conceituais de projeto.

Neste primeiro experimento, pôde-se concluir que o software SketchUp é uma excelente ferramenta para criação e representação visual de modelos (figura 14). Segundo Mills (2007), é um programa bastante intuitivo, pois prevê os traços ao se desenhar, ou seja, quando se move o mouse para uma direção específica, os volumes ganham altura ou largura de forma equivalente. Porém, não é uma ferramenta adequada quanto à precisão e tolerância, pois o modelo geométrico resultante apresenta muitas falhas na malha de triângulos que compõem a sua

superfície (figura 15).



Figura 14: Modelo trabalhado no SketchUp - planta do museu (EL CROQUIS, 1995); foto da maquete (PIROUX, 2007)

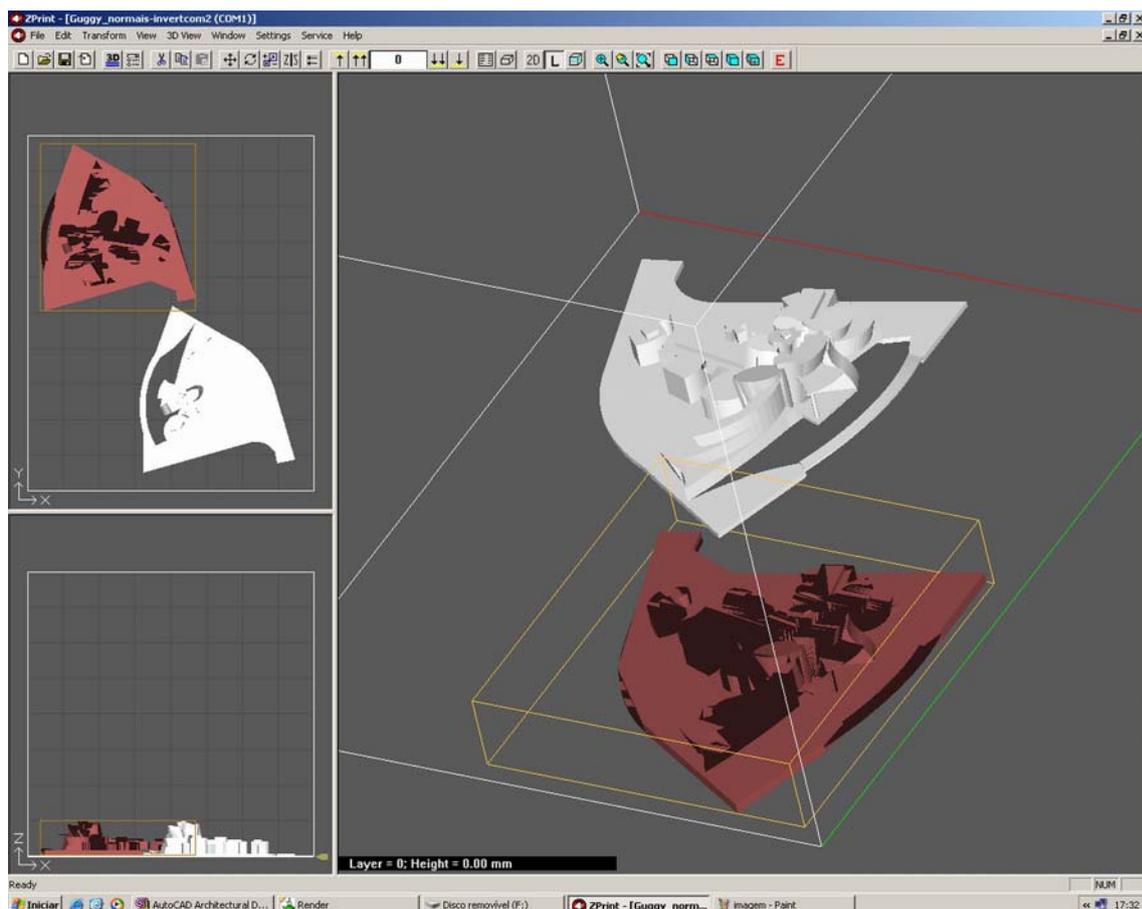


Figura 15: Erros na estrutura do modelo, detectados no software ZPrint

Num segundo momento, o modelo criado anteriormente no SketchUp foi exportado em formato DXF e importado para o AutoCAD. Nele, o modelo foi totalmente redesenhado sobre o anterior, por meio de superfícies, com a utilização dos comandos `edgesurf`, `3dpoly` e `region`. Utilizando-se esses comandos, foi possível trabalhar o modelo como uma superfície contínua, evitando arestas irregulares, coincidindo vértices e evitando superfícies sobrepostas (figura 16).



Figura 16: Modelo trabalhado no AutoCAD utilizando superfícies contínuas

O modelo assim obtido demonstrou ser mais preciso que o anterior, gerado no programa SketchUp (figura 14).

Depois de finalizado no AutoCAD, o modelo foi então exportado por meio do comando 3dsout, no formato 3DS e novamente aberto no programa Zprint.

Mesmo com toda a precisão aplicada na referida modelagem, esta ainda apresentou alguns erros, como mostra a figura (17). De acordo com Volpato (2007), as partes escuras representam a inversão dos vetores normais, ou normais inconsistentes, que acontece quando a regra da mão-direita¹ para orientação da normal em relação ao triângulo não é respeitada e há uma inconsistência na representação.

Em uma última tentativa de modelagem geométrica procurou-se construir o edifício escolhido com a utilização apenas de sólidos, e não de faces, com o objetivo de melhorar a qualidade do arquivo STL exportado.

¹ A regra da mão-direita determina a direção positiva do eixo Z quando as direções X e Y são conhecidas em um sistema de coordenadas 3D.

Neste experimento, o modelo criado anteriormente com superfícies foi totalmente modelado em sólidos, com o comando loft. Utilizando o modelo de superfícies como referência, foi possível redesenhar a parte superior de inferior de cada volume do modelo por meio de polylines e utilizar o comando loft para construir o volume sólido unindo a base ao topo em cada bloco (figura 18).

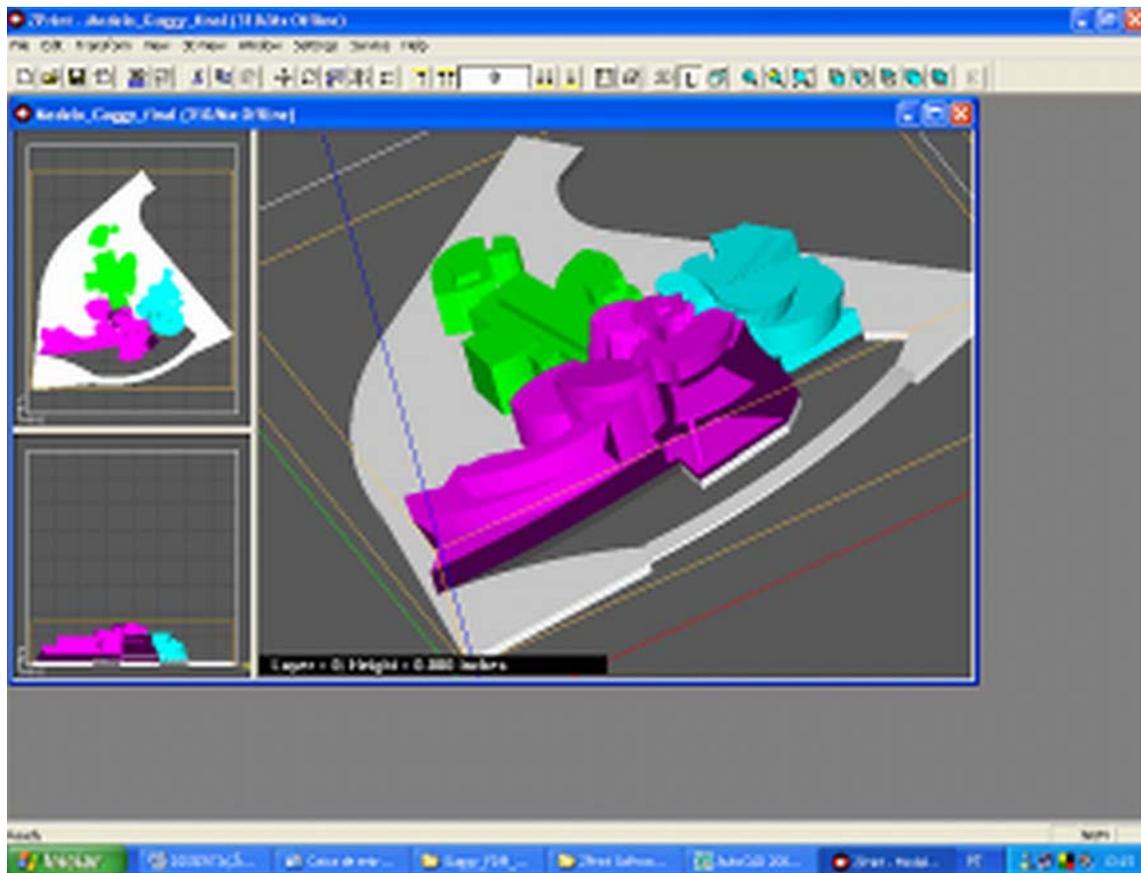


Figura 17: - Inversão dos vetores normais detectados no software Zprint

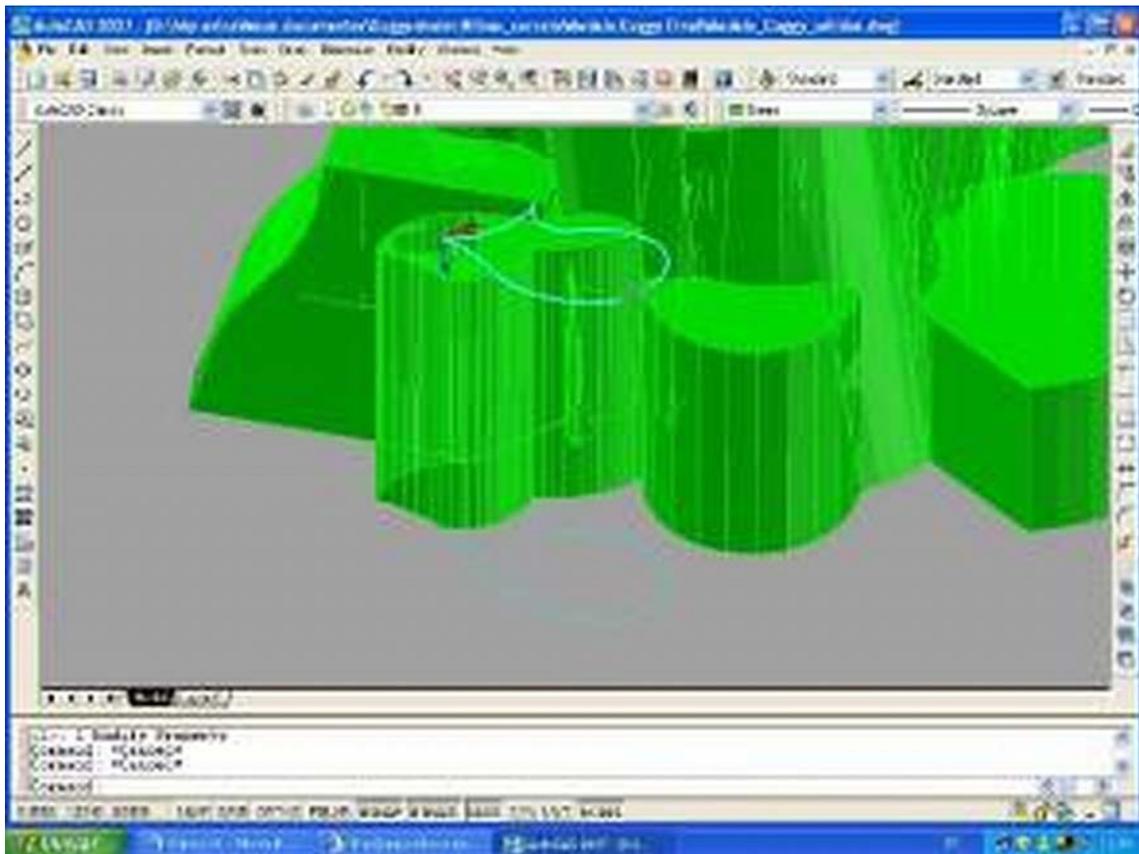


Figura 18:Redesenho das faces superiores e inferiores do volume em polylines

4.6 PRODUÇÃO DAS MAQUETES FÍSICAS

1º Experimento - Impressão na *ZCorp* com pó zp130

O modelo geométrico tridimensional do Museu Guggenheim de Bilbao, modelado em sólidos no AutoCAD 2007 foi utilizado neste experimento para a impressão na *ZCorp* utilizando o pó zp130 e também para os demais experimentos.

Neste experimento, foram seguidas as instruções e materiais indicados pelo fabricante (figura 19).

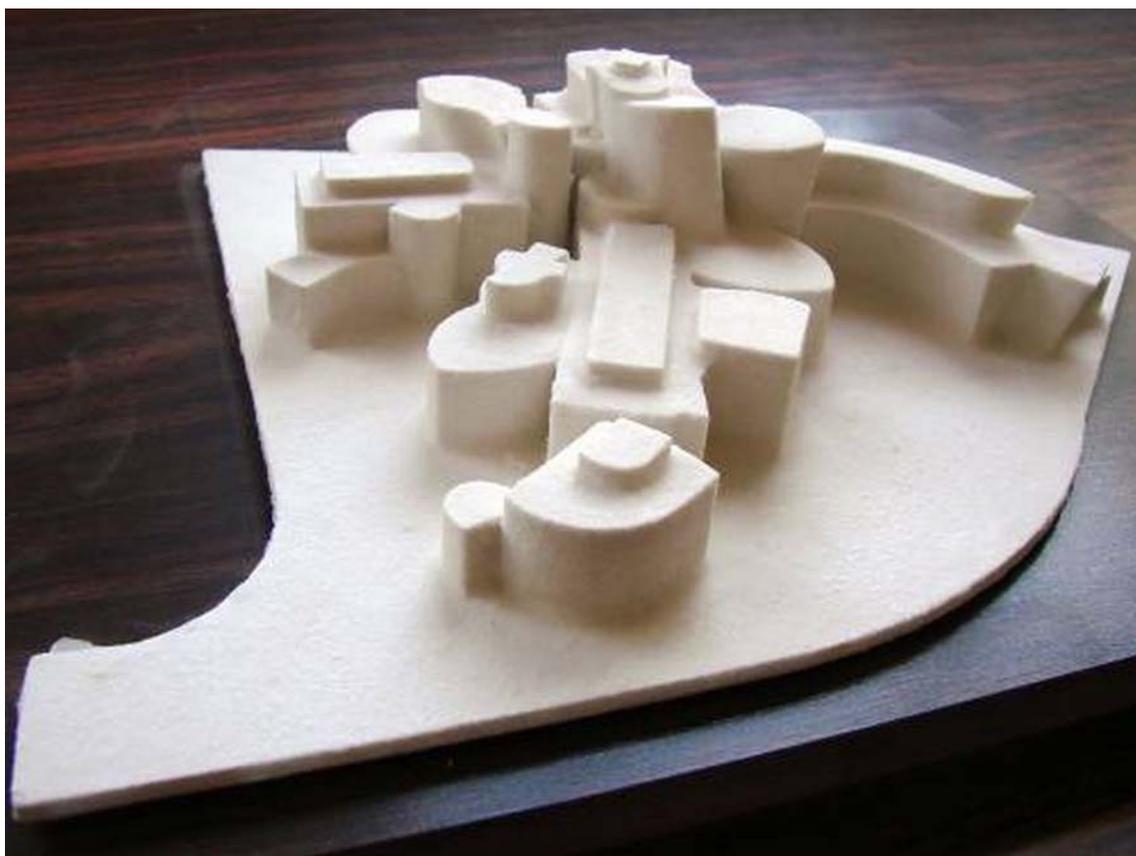


Figura 19: Modelo resultante do Experimento 1 (200 x 200 x 85mm)

2º Experimento - Impressão na ZCorp com outros materiais

Neste experimento, repetiu-se a confecção do protótipo com a máquina ZCorp, entretanto modificou-se o material utilizado. Experimentou-se materiais comumente utilizados na confecção de maquetes arquitetônicas, como o gesso comum e o gesso odontológico (figuras 20 e 21).



Figura 20: Primeiros testes utilizando gesso comum



Figura 21: Limpeza do modelo prototipado em gesso (Experimento 2)

3º Experimento - Impressão na FDM

O presente experimento foi conduzido no CenPRA utilizando o equipamento *Stratasys FDM™ System*, modelo *Vantage i* (ABS). Este equipamento possui um *software* chamado *Insight* que prepara o modelo geométrico tridimensional a ser prototipado. O modelo é importado em formato STL e por meio de um comando chamado *slice*, o software envia as camadas do modelo geométrico para a máquina FDM. Esse modelo pode ser construído de duas maneiras: hachurado (shell), que fica vazado internamente (figura 22) ou totalmente sólido.

Durante o processo de produção, a máquina constrói o modelo com um tipo especial de plástico ABS com baixo ponto de fusão, que pode ser branco ou em cores, e cria suportes para os detalhes em um tipo de ABS solúvel, na cor marrom escuro (figura 23).



Figura 22: Registro fotográfico do processo de PR do Experimento 3



Figura 23: Registro fotográfico do processo de PR do Experimento 3

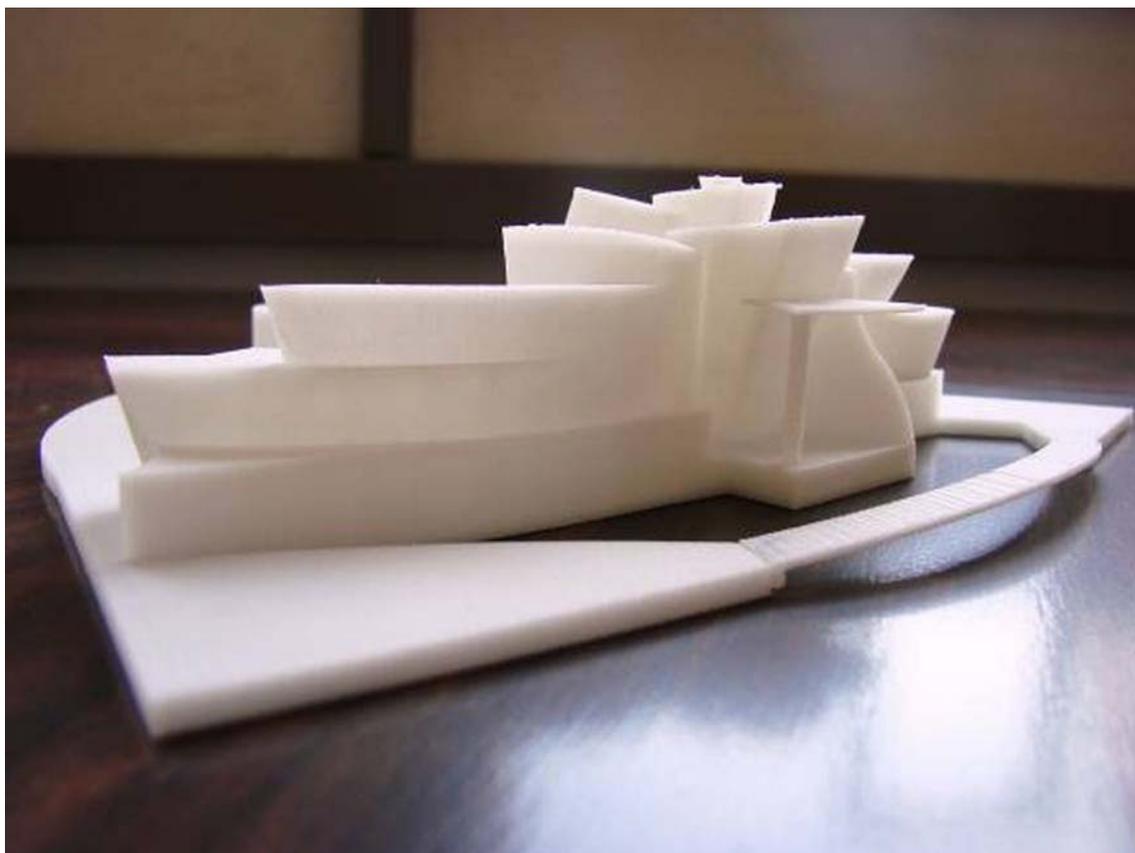


Figura 24: Modelo finalizado na FDM -Experimento 3 (200 x 200 x85mm)

Depois de finalizado na FDM (figura 24), o modelo é transportado para uma lavadora ultra-som, mergulhado numa solução de 95% água e 5% de soda cáustica aquecida, onde o ABS resistente permanece e os suportes são dissolvidos, sem a intervenção do usuário, sistema também chamado de *Waterworks*.

4º Experimento - Cortadora a laser + Pepakura Designer

Neste experimento, o objetivo foi fabricar a maquete física do Museu Guggenheim de Bilbao utilizando a cortadora a laser Universal Laser Systems X-660-60, existente no LAPAC. Este experimento testou a construção 3D a partir de um modelo sólido planejado. Utilizou-se o *software* chamado *Pepakura Designer* desenvolvido por Mitani e Suzuki na Universidade de Tóquio (figura 25). O *Pepakura* consiste num método desenvolvido para transformar brinquedos modelados no computador em modelos para serem montados em papel. O *Pepakura* racionaliza o modelo 3D, une as superfícies adjacentes, planifica e subdivide o modelo 3D, desdobrando-o em partes correspondentes ao modelo original. O programa também especifica as linhas de corte, de vinco e as abas de colagem em cada uma das peças para que sejam posteriormente montadas. (MITANI; SUZUKI, 2004).



Figure 1. (a) Mesh models. (b) Making papercraft toys with a computer. (c) Papercraft toys of the mesh models.

Figura 25: Pepakura Designer (MITANI; SUZUKI, 2004)

Depois de decompostas, as partes resultantes podem ser salvas ou exportadas em DXF e abertas no AutoCAD. Dentro do AutoCAD (figura 4.26), o arquivo pode ser enviado para a cortadora a laser, seguindo uma configuração parecida com a emissão de um arquivo para a plotagem. Porém, onde se configura cores e espessura das penas, no *driver* da cortadora a laser são especificados o tamanho do papel, a potência do laser e o tipo de corte (vinco ou corte) dependendo do material que será usado. Neste experimento, foi determinado que as peças seriam cortadas no papel cartão (figura 4.27), que possui uma espessura de papel que permite que as peças seja facilmente dobradas, encurvadas e coladas, possuindo ao mesmo tempo a rigidez e estabilidade necessárias para a montagem do modelo volumétrico (28 e 29).

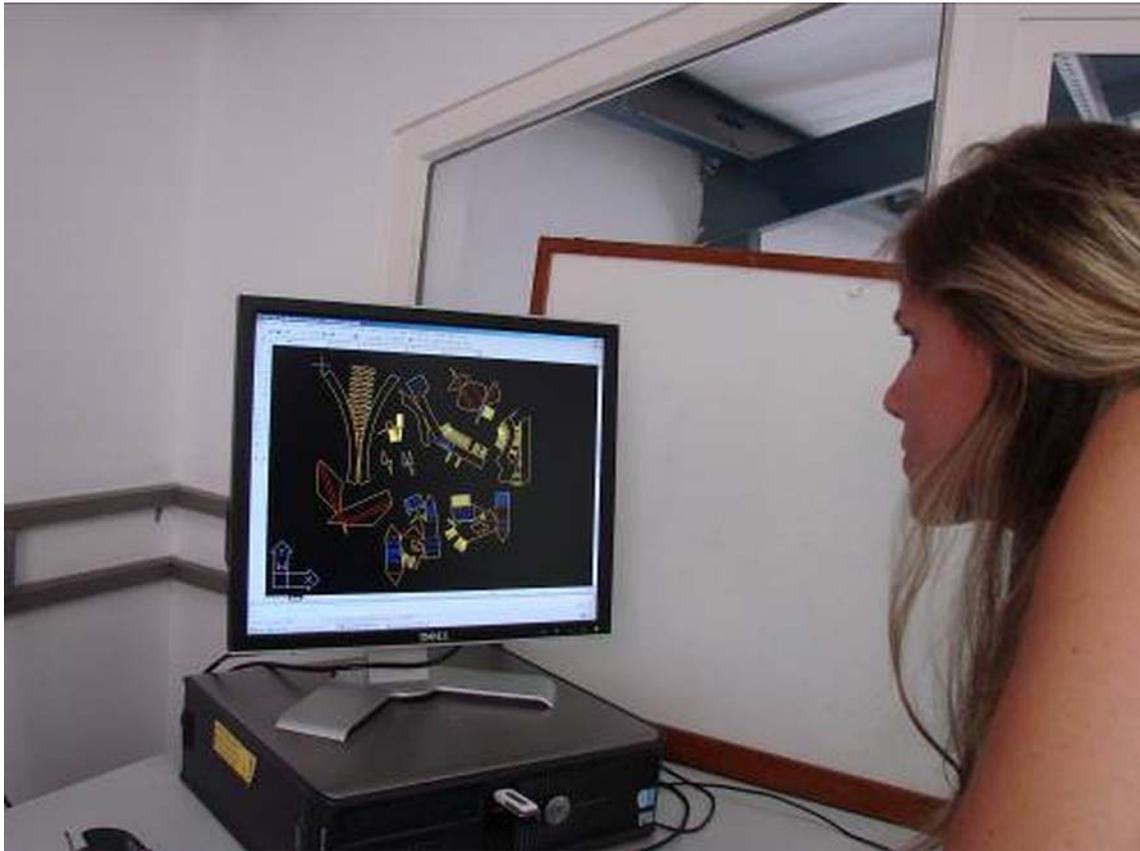


Figura 26: Resultado do desdobramento aberto no AutoCAD



Figura 27: Peças do modelo do Museu Guggenheim de Bilbao cortadas na cortadora a laser

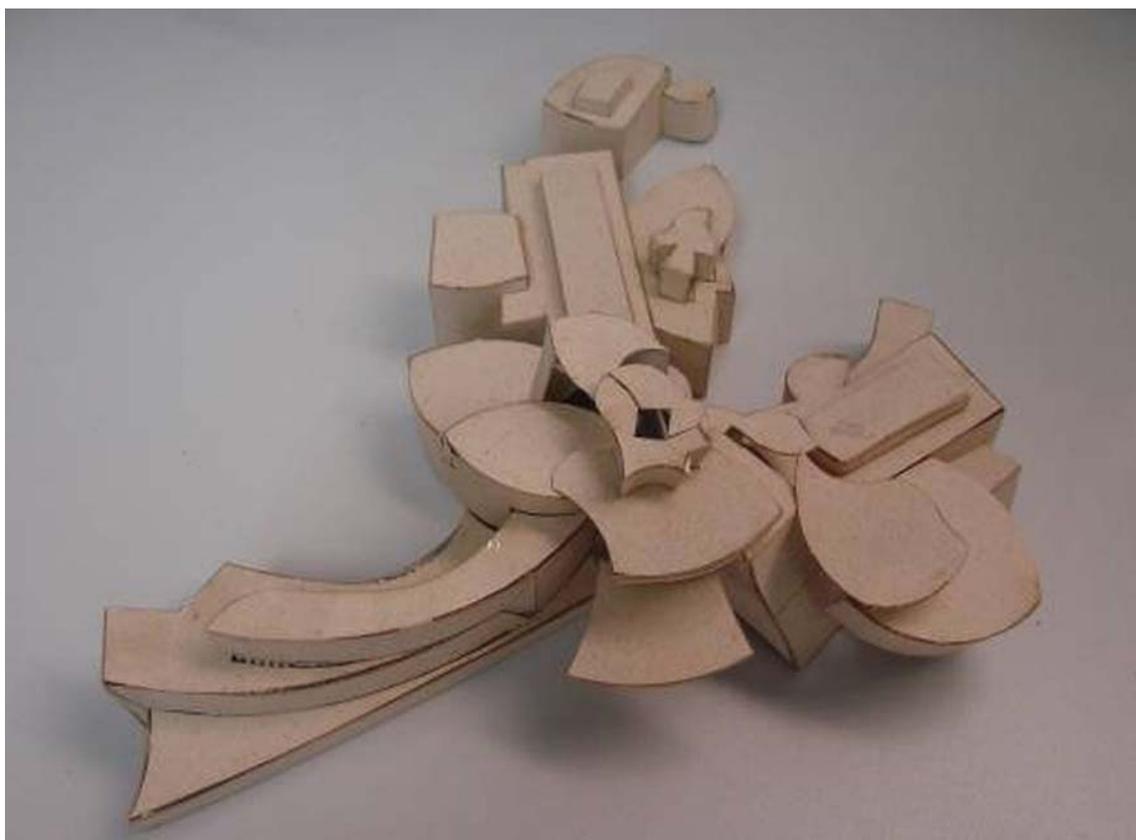


Figura 28: Modelo em fase de montagem no papel cartão no Experimento 4

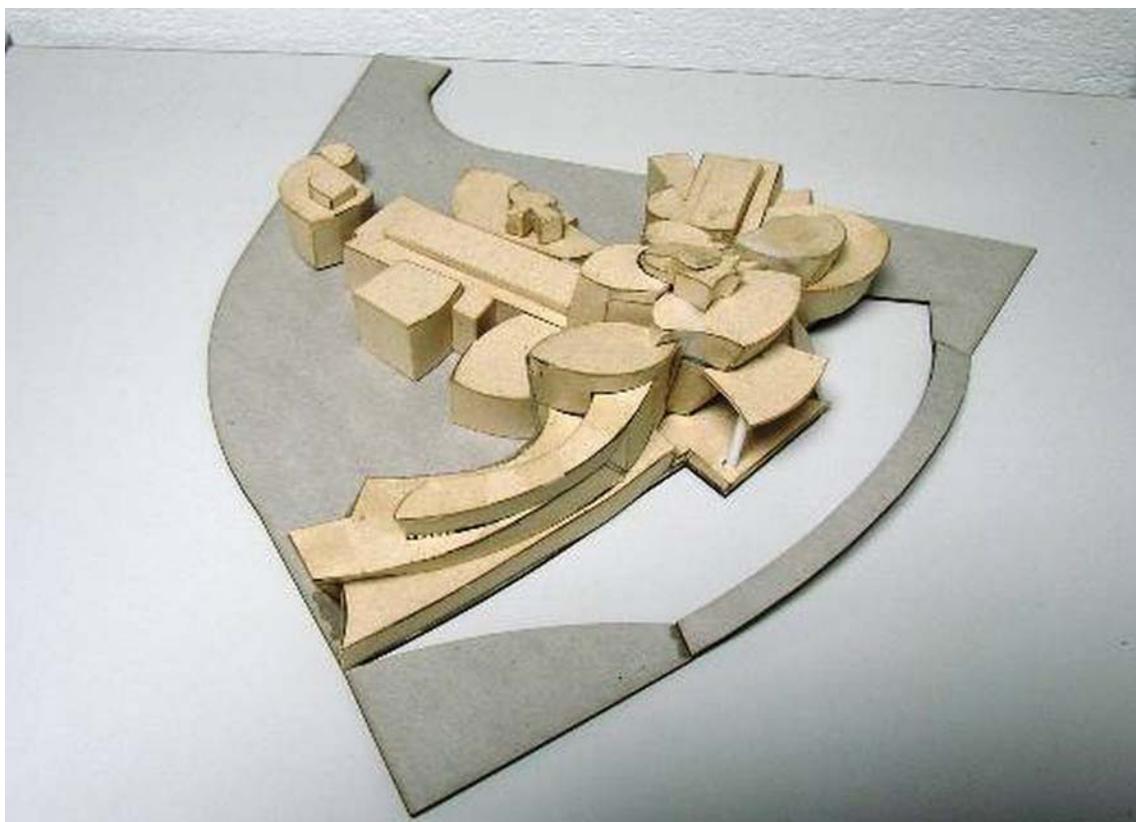


Figura 29: Modelo finalizado em papel cartão no Experimento 4 (200 x 200 x 85mm)

5º Experimento - Cortadora a laser + AutoSlice

Neste experimento com a cortadora a laser Universal Laser Systems X-660-60 existente no LAPAC, usada no experimento anterior, variou-se o processo de transformação 3D em 2D. Neste caso utilizou-se um processo parecido com o método chamado LOM (*Laminated object manufacturing*). Como o próprio nome já sugere, o LOM é um processo de fabricação de objetos em lâminas. Esse processo é comercializado pela *Cubic Technology* e se baseia na deposição sucessiva de folhas de materiais contendo adesivos em um dos lados para construir a peça camada por camada (VOLPATO, 2007).

Para desenvolver este experimento baseado no processo LOM, utilizou-se o modelo geométrico tridimensional modelado em sólidos no *Autocad 2007* e um *software* desenvolvido no LAPAC pela profa. Gabriela Celani, o *AutoSlice*, que é um programa desenvolvido em linguagem VBA (*Visual Basic for Application*) e que fatia objetos sólidos na espessura definida pelo usuário (figuras 30 a 33).

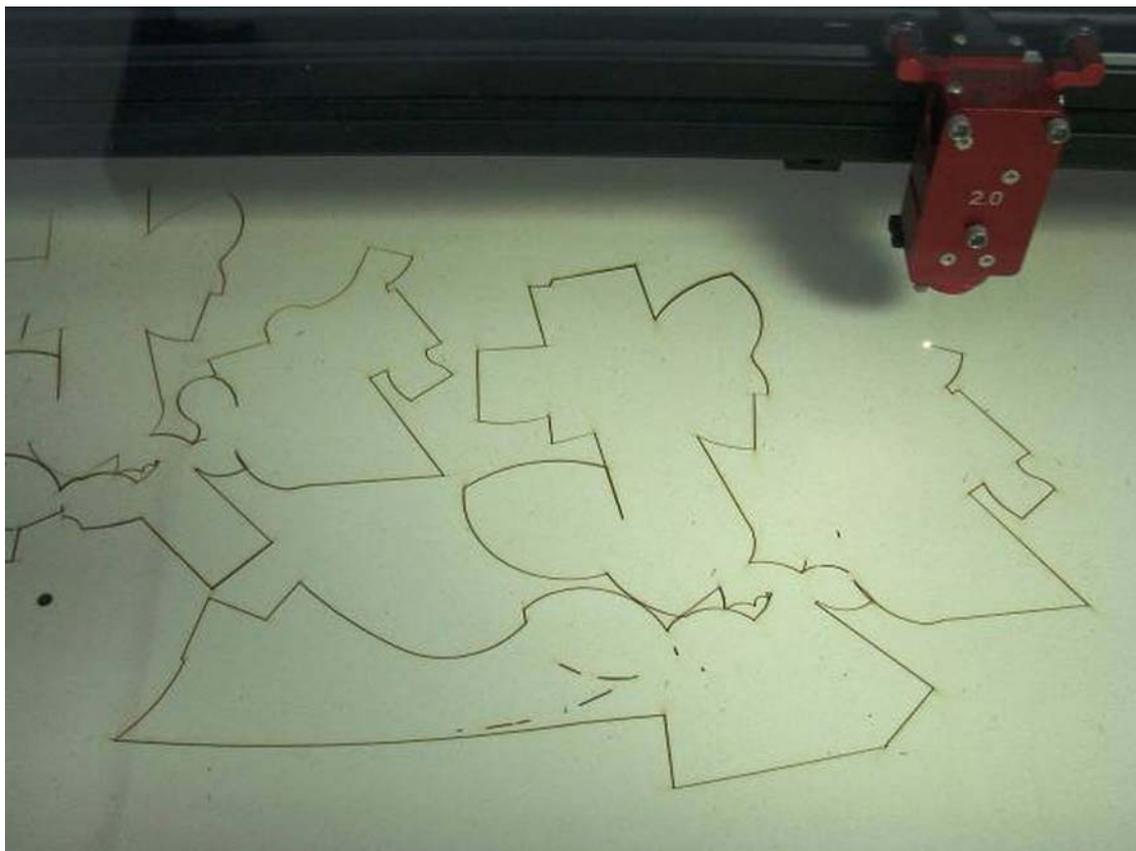


Figura 30: Cortadora a laser cortando o papel cartão para o Experimento 5



Figura 31: Colagem das camadas no Experimento 5



Figura 32: Cortadora a laser cortando o acrílico para o Experimento 5

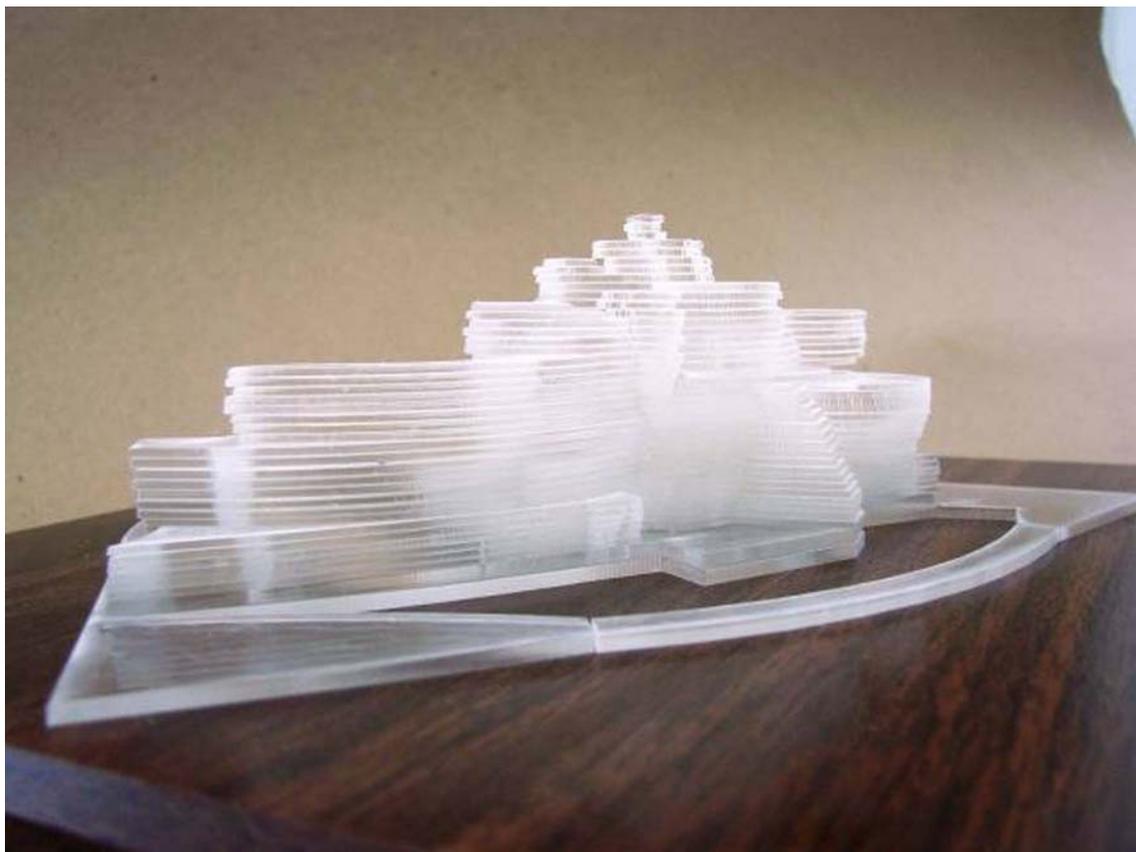


Figura 33: Colagem das camadas em acrílico no Experimento 5

4.7 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

O modelo resultante do 1º experimento, utilizando a impressora *ZCorp* e pó *zp130*, apresentou menor tempo na sua execução, além de uma boa precisão e qualidade, porém com um custo relativamente alto. Pode-se concluir aqui que, se por um lado esse experimento contribui para a rapidez na execução e um bom resultado no modelo, por outro, o alto custo do material utilizado nesse equipamento de PR inviabiliza a confecção de maquetes de estudo volumétrico, nas fases conceituais do projeto.

A maquete produzida no 2º experimento, usando a mesma máquina e gesso odontológico, assim como no experimento anterior, apresentou menor tempo em sua execução, baixo custo do material utilizado, porém com uma redução na qualidade do modelo obtido, tanto do ponto de vista de sua resistência, como de sua resolução. Tal modelo, contudo, é suficientemente bom para o uso nas etapas iniciais e intermediárias do processo de projeto em arquitetura, em que não se exige tanta precisão e em que são utilizados predominantemente estudos volumétricos.

No 3º experimento, a maquete produzida com o processo FDM resultou em um modelo bastante preciso, com ótimo acabamento superficial e bastante resistente. Contudo, é um dos procedimentos mais demorados, além de apresentar um custo alto, o valor do ABS, material utilizado na confecção da peça e nos suportes, é bastante elevado, o que inviabiliza do ponto de vista econômico, o uso dessa técnica para a produção de modelos e maquetes de estudo volumétrico.

O 4º experimento, no qual se utilizou a cortadora a laser junto com o *software Pepakura*, resultou em soluções surpreendentes e com uma boa qualidade. A princípio a quantidade de peças é assustadora, levantando dúvidas sobre o sucesso do resultado final. Porém, com o auxílio do *software Pepakura*, o modelo foi construído sem grandes problemas, ainda que o processo de montagem e colagem das peças fosse um pouco demorado. O custo para execução do modelo é baixo, favorecendo a execução de vários modelos para teste. Além disso, há de se levar em conta que o modelo desenvolvido no experimento representa um caso extremo de complexidade, e que a execução de modelos mais simples pode ser feita com maior facilidade e rapidez pelo mesmo método.

O 5º experimento, no qual também se utilizou a cortadora a laser, porém em parceria com o *software AutoSlice*, resultou em uma maquete de rápida execução e montagem, com um bom resultado volumétrico, apesar de não fornecer alto grau de precisão nos detalhes menores. Utilizando-se esta técnica, o valor do modelo varia de acordo com o material empregado. O referido experimento utilizou dois tipos de materiais: o papel cartão que é um material de baixo custo e o acrílico, que é um material relativamente caro. É possível também utilizar outros materiais, como laminas de madeira e cortiça. Por ser rápido e de baixo custo, este procedimento é adequado para a execução de maquetes conceituais e até mesmo de apresentação, pela beleza e plasticidade dos modelos resultantes.

A partir da análise dos dados obtidos nos experimentos, pode-se dizer que existem procedimentos e máquinas adequados para cada tipo e finalidade de maquete. Utilizou-se aqui um modelo de alta complexidade (Guggenheim de Bilbao) com a finalidade de testar os limites de cada equipamento e sugerir técnicas alternativas de construção desse modelo.

5 CONCLUSÕES

Nas últimas décadas, com a popularização das técnicas de modelagem geométrica tridimensional e com os avanços da computação gráfica, pode-se dizer que as maquetes físicas, mais trabalhosas e demoradas, têm desaparecido dos ateliês de arquitetura. É inegável a modelagem geométrica tridimensional é vantajosa

porque permite avaliar e detectar conflitos de projeto que seriam difíceis de prever em desenhos bidimensionais. Por outro lado, as maquetes virtuais sempre apresentam distorções de perspectiva, o que torna a percepção do espaço diferente da realidade. Também é fato que, certas características da maquete física, como a manipulação direta de diferentes materiais e texturas e a interação entre as pessoas envolvidas no projeto, não podem ser substituídas pela modelagem geométrica tridimensional.

A produção digital de maquetes arquitetônicas, explorada nesta pesquisa, mostra que é possível utilizar a modelagem geométrica tridimensional e a maquete física num processo integrado.

Esta pesquisa buscou explorar e desvendar este processo por meio da pesquisa bibliográfica e dos experimentos realizados no recém instalado LAPAC e no CenPRA. Estes experimentos permitiram conhecer melhor os softwares de modelagem geométrica tridimensional e os equipamentos de prototipagem rápida utilizados no processo de produção digital de maquetes arquitetônicas. As maquetes do Museu Guggenheim de Bilbao, de Frank Gehry, produzidas em diferentes técnicas e materiais, inclusive materiais alternativos, comprovaram que a produção digital de maquetes arquitetônicas é viável em termos de procedimentos, de custo, de materiais disponíveis no mercado, qualidade das maquetes produzidas e rapidez na execução.

6 REFERÊNCIAS

3D SYSTEMS. Protótipo de jóia confeccionado em SL. Disponível em: <http://www.3dsystems.com/products/solidimaging/accura/index.asp>> Acesso em: 21 set. 2006a.

CELANI, G. CAD criativo. São Paulo: Campus, 2003.

CELANI, M. G. C. ; PINHEIRO, E. ; VAZ, C. E. V. ; CYPRIANO, D. ; STOYANOV, M. R. Imprimindo idéias: viabilização do uso de impressoras 3d para maquetes arquitetônicas. In: GRAPHICA, 18., 2007, Curitiba. Anais do XVIII Simpósio Nacional de Geometria Descritiva e Desenho Técnico. Curitiba, 2007.

CELANI, G. Uma introdução ao *computational design* e às *shape grammars* na arquitetura e no desenho industrial. Interpretar arquitetura, Belo Horizonte, v.7, 2004.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP. Vinyl cutter examples. Disponível em: < http://ddf.mit.edu/devices/vinyl_cutter_examples.html> Acesso em: 20 set. 2006a.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP. Devices - Modella Miller Disponível em: < http://ddf.mit.edu/devices/modella_miller.html> Acesso em: 20 set. 2006b.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP. Modela Miller examples. Disponível em: < http://ddf.mit.edu/devices/modela_miller_examples.html> Acesso em: 20 set. 2006c.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP. Devices - Denford Miller Disponível em: < http://ddf.mit.edu/devices/denford_miller.html > Acesso em: 20 set. 2006d.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP. Denford Miller examples Disponível em: < http://ddf.mit.edu/devices/denford_miller_examples.html> Acesso em: 20 set. 2006e.

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

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP. FDM Printer examples. Disponível em: < http://ddf.mit.edu/devices/fdm_printer_examples.html > Acesso em: 22 set. 2006g.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP. Projects: Palladio's Villas Disponível em: < http://ddf.mit.edu/projects/PALLADIO/p_villas_home.html > Acesso em: 23 set. 2006h.

DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP. Denford Miller examples. Disponível em: < http://ddf.mit.edu/devices/denford_miller_examples.html > Acesso em: 23 set. 2006i.

JACOBS, P.F. Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography : Society of Manufacturing Engineers, Dearborn - MI, 1992. 434p.

KILIAN, A. Fabrication of partially double-curved surfaces out of flat sheet materials through a 3d puzzle approach. In: Association for Computer Aided Design in Architecture - ACADIA'03, 2003. Indianápolis, p. 73-83. Disponível em: < <http://itc.scix.net/data/works/att/aa33.content.05608.pdf> > Acesso em: 20 set. 2006.

MILLS, C.B. Projetando com maquetes. Porto Alegre: Bookman, 2007. 264p.

MIT. Exemplo de aplicação da cortadora de vinil: Open Course Ware Architecture 4-510 Fall 2005. Disponível em: < <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Architecture/4-510Fall2005/Assignments/index.htm> > Acesso em: 03 set. 2006a.

MIT. Exemplo de aplicação da cortadora a jato de água: MIT Open Course Ware Architecture 4-510 - Fall 2005. Disponível em: < http://ddf.mit.edu/courses/examples/4.510_example_b.pdf > Acesso em: 03 set. 2006b.

MIT. Exemplo de objeto feito com a cortadora a laser e com FDM: MIT Open Course Ware Architecture 4-510 Fall 2005. Disponível em: < <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Architecture/4-510Fall2005/Assignments/index.htm> > Acesso em: 03 set. 2006c.

MITANI, S.; SUZUKI, H. Making papercraft toys from meshes using strip-based approximate unfolding. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE

TECHNIQUES , ACM SIGGRAPH'04. , 2004, Los Angeles, Califórnia. Graphics is fun. Los Angeles, 2004. p. 259 - 263.

MITCHELL, W. J. The logic of architecture: design, computation and cognition. Cambridge, MA: The MIT Press, 1996. 304p.

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

MITCHELL, W. J.; MCCULLOUGH, M. Digital design media. 2 ed. New York, 1995. 280 p. <<http://www.zturk.com/pouk/racunalnistvo/mitchell.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2004.

PIROUX, J.L. Maquette carton. Disponível em <<http://graph3d.chez-alice.fr/NewFiles/eBilbao.html>> Acesso em 20 mai. 2007.

SASS, L. MIT Open Course Ware: 4-510 Fall 2005. Disponível em: <<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Architecture/4510Fall2005/DownloadthisCourse/index.htm>> Acesso em: 03 set. 2006a.

SASS, L. Synthesis of design production with integrated digital fabrication. Automation in construction, 2006b, v.16, n.3, p. 298-310.

SASS, L. Design Fabrication: design, computation and computer controlled devices Lecture#3. Disponível em: <http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Architecture/4212Spring2003/2EFD5D481C1342CF9C5D7E6E0C81E837/0/4212_LECT_03ipfreeoutput.pdf> Acesso em: 27 set. 2006c.

SASS, L. Design Fabrication: design, computation and computer controlled devices-lecture#8. Disponível em: <http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Architecture/4-212Spring2003/A7A61961-88F8-4F95-9070-038AE244AB48/0/4212_LECT_09Aipfreeoutput.pdf> Acesso em: 27 set, 2006d.

SASS, L. Digital Mockups - workshop : tall building design and construction - spring2005. Disponível em: <http://ddf.mit.edu/courses/examples/4.511_final_presentation_2005.pdf> Acesso em: 11 out. 2006e.

SASS, L. Design Fabrication - workshop: systems of design, computation & fabrication. Disponível em: <<http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Architecture/4-173Spring2004/8A086E6E-4ABA-42FD-84C3-6FEED8DD9E75/0/lec6.pdf>> Acesso em: 09 nov. 2006f.

SASS, L. Materializing design: the implications of rapid prototyping in digital design. Design Studies, 2006g. v.27, n.3, p.325-355.

SASS, L. [Gehry Partners] + [Fab Shop] - spring 2004 - lecture # 7. Disponível em: <
http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Architecture/4-206Spring2004/B70C3821BD294360B252B442373C8BD3/0/4206_LLECT_07_bAipfreeoutput.pdf> Acesso em: 09 nov. 2006h.

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

SILVA, J.V.L. et al. Rapid Prototyping: concepts, applications and potencial utilization in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CAD/CAM, ROBOTICS AND FACTORIES OF THE FUTURE, 15., 1999, Águas de Lindóia. , 1999.

STRATASYS. Sistema FDM da Stratasys. Disponível em: <
http://intl.stratasys.com/sys_gallery.html> Acesso em: 21 set. 2006.

UNIVERSAL LASER SYSTEMS. M-300 Laser Platform Disponível em: <
http://www.ulsinc.com/english/laser_systems/laser_systems.html> Acesso em: 18 set. 2006.

ZCORP. Sistema 3DP da ZCorporation. Disponível em: <
<http://zcorp.com/products/printersdetail.asp?ID=1>> Acesso em: 22 set. 2006.

7 PALAVRAS-CHAVE

Fabricação digital, maquetes arquitetônicas, prototipagem rápida