

Fabricação digital de maquetes físicas: tangibilidade no processo de projeto em Arquitetura¹

Digital fabrication of physical models: tangibility in design process in Architecture

Wilson Florio

Arquiteto e Urbanista – FAU Mackenzie, Doutor em Arquitetura e Urbanismo – FAU/USP, Professor de Projeto e de Computação Gráfica – FAU Mackenzie e Unicamp e Líder do Grupo de Pesquisa “Arquitetura, Processo de Projeto e Análise Digital”.
São Paulo – SP [Brasil]
wflorio@uol.com.br

Ana Tagliari

Arquiteta e Urbanista – FAU Mackenzie, Mestre em Artes- IA/ Unicamp, Doutoranda em Arquitetura – FAUUSP, Professora de Projeto e de Representação do Departamento de Exatas – Uninove e Integrante do Grupo de Pesquisa “Arquitetura, Processo de Projeto e Análise Digital”.
São Paulo – SP [Brasil]
anatagliari@hotmail.com

Neste artigo, são relatados dois diferentes tipos de experimentos. No primeiro, o modelo digital tridimensional é transformado em superfícies 2D pela técnica *unfolding*, impresso e montado manualmente. No segundo, foram realizados experimentos com o auxílio da Cortadora Universal Laser Systems. A intenção é discutir o papel dos artefatos físicos na compreensão de formas e espaços complexos e buscar modos mais eficazes de aperfeiçoar o processo de projeto. Os resultados obtidos até o presente momento permitem afirmar que, apesar de limitações em sua fabricação, os modelos obtidos por corte a *laser* contribuem para melhorar substancialmente a compreensão de projetos, particularmente de detalhes de elementos construtivos, pois permite materializar e pormenorizar a análise, decompondo e recompondo o objeto bi e tridimensionalmente. As restrições observadas dizem respeito à escala do artefato, a bidimensionalidade dos desenhos e dimensões da área de corte.

Palavras-chave: Corte a *laser*. Fabricação digital. Maquete. Processo de projeto. Tangibilidade.

In this article two different types of experiments are discussed. In the first one we have a 3D digital model transformed into 2D surfaces by the “unfolding” technique, printed and manually assembled. In the second one, some experiments were made using the Universal Laser Cutter Systems. The aim is to discuss the role of the physical artifacts during the process of understanding complex forms and spaces, and to pursuit more efficient ways to improve the design process. The results until the present moment allow to confirm that, although the limitations in its fabrication, the models created by the laser cutter substantially contribute to improve the comprehension of projects, particularly constructive details, which allows to materialize and analysis details, decomposing and recomposing the object two and three-dimensionally. The restrictions which were observed are related to the scale of the artifact, the two-dimensionality of the drawings and the cutting area dimensions.

Key words: Design process. Digital fabrication. Laser cutting. Model. Tangibility.

1 Introdução

As recentes pesquisas sobre fabricação digital de maquetes têm renovado o interesse a respeito dos diversos meios de representação e simulação em arquitetura. Nesse âmbito, estão os protótipos rápidos (PR), que cumprem o papel de traduzir arquivos *Computer Assistant Design* (CAD) 3D em modelos físicos. A materialização de projetos por meio de PRs torna mais tangível a compreensão da proposta arquitetônica. O objetivo neste artigo é relatar alguns experimentos realizados pelos autores na produção de maquetes a partir de desenhos e modelos geométricos digitais e discutir o processo de projeto em arquitetura.

Os PRs podem ser obtidos utilizando-se três tipos de processos: por meio de cortadoras, por subtração de material ou por adição de material. O primeiro grupo abarca as cortadoras a *laser*, a jato de água e de vinil. No processo subtrativo, o modelo é esculpido após a remoção de material por meio de ferramentas em máquinas por controle numérico computadorizado (CNC). No processo aditivo, adicionam-se camadas de matéria, normalmente resinas. Assim, verifica-se que os PRs são convenientes para a fabricação tanto de elementos regulares como complexos, sobretudo para fabricar formas irregulares de difícil confecção manual. No entanto, neste artigo são relatados experimentos realizados manualmente e com o auxílio da Cortadora Universal Laser Systems X-660.

O processo de prototipagem rápida por corte a *laser* requer a preparação de desenhos bidimensionais no computador para posterior construção de modelos físicos tridimensionais. Os desenhos em CAD devem ser planejados já prevendo possíveis encaixes para futura montagem manual dos componentes em três dimensões. Embora essas cortadoras a *laser* possam cortar diversos materiais, tais como papéis de vários tipos, acrílico,

madeira, e plástico em diferentes espessuras, foram utilizados nos experimentos apenas papel de 1 mm para testar vantagens e desvantagens desse processo e algumas limitações na produção de artefatos físicos de projetos de arquitetura.

O artigo contém uma breve síntese de alguns estudos já realizados por outros autores, inserindo os PRs no processo de projeto. Em seguida, é apresentada a experiência na produção de PRs dos autores e o relato, pormenorizado, das etapas de preparação e de fabricação de diferentes edifícios, utilizando, para isso, a cortadora a *laser*.

Os outros pequenos experimentos foram modelados no programa Form.Z. Nesse programa, foi utilizada a técnica do *unfolding*, que permite desdobrar as superfícies do modelo 3D, ou seja, planificar e subdividir o modelo 3D em superfícies 2D. 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.

Os resultados obtidos e as restrições observadas são apresentados nas conclusões finais do artigo.

2 O processo de projeto

A representação externa, com artefatos tradicionais, tais como esboços e modelos físicos, estimula a imaginação e a produção de novas propostas. As atividades motoras usando desenhos e modelos fazem emergir novas ideias a partir da manipulação e “re-interpretação” daquilo que foi produzido. O gesto, por exemplo, atua como um recurso de comunicação que amplia a consciência no espaço de trabalho. O pensamento é inseparável de seu meio de expressão (HERBERT, 1992).

Projeto é uma interação de fazer e ver, fazer e descobrir (SCHÖN, 2000). Assim, as representações e simulações analógicas e digitais assumem

porque é possível manipular na realidade aquilo que o conhecimento distante não oferece.

As mãos podem contribuir muito para o trabalho e para o conhecimento. Apontando, empurrando, puxando e pegando em ferramentas elas atuam como condutores por meio do quais se estende o desejo de atuar no meio físico. As mãos trazem o conhecimento do mundo (McCULLOUGH, 1996).

Como exploração da forma em modelagem geométrica, protótipos rápidos estão acelerando a habilidade de explorar possibilidades formais sob o formato físico. Essa produção está se tornando o lócus para improvisação e prática de pessoas com talento. O ato de fazer artefatos digitais está aumentando de modo complementar a relação com a configuração física (McCULLOUGH, 1996).

A falta de habilidade do estudante e a complexidade da forma do edifício pode se constituir como fatores impeditivos para a construção de modelos físicos. Fazer modelos no modo tradicional demanda considerável treinamento e desenvolvimento de habilidades manuais e destreza.

Entretanto, o advento e a adoção do maquinário de prototipagem e fabricação rápida têm tornado possível para pessoas comuns, estudantes e até mesmo crianças, produzir artefatos físicos usando meios computacionais (OH et al., 2006).

Modelos físicos tridimensionais são dispositivos poderosos que ajudam as pessoas a ver e entender projetos. Pode-se manter um modelo físico na mão, separá-lo e reuni-lo de diferentes modos. Como afirmou Oh et al. (2006, p. 124), essa habilidade de interagir fisicamente com um modelo é importante para pensar o projeto. De fato, a experiência de projetar com modelos 3D possibilita desenvolver habilidades espaciais que arquitetos não podem facilmente adquirir por outros meios, como por exemplo, com o desenho ou com a modelagem gráfica computacional.

Protótipos rápidos podem “re-introduzir” algumas qualidades do domínio tácito no contexto que engaja tanto o campo conceitual e cerebral como aquele inerentemente sensorial tátil (MOODEN, 2005).

A teoria de ensino enfatiza a importância de fazer coisas para aprender (BLUST; BATES, 2004). O modelo físico é um grande modo de educar e motivar o estudante e pode melhorar significativamente sua aprendizagem (WELCH; KLOSKY, 2007). A importância de uma experiência prática que envolva “mãos a obra” (KENDIR, 2006), conciliando o aprendizado visual e o tátil, torna-se primordial para que o estudante aprenda de forma duradoura e profunda, e tenha uma participação ativa nesse processo.

4 Antecedentes

Desde os anos 1990, tem-se acompanhado a fabricação digital protótipos rápidos e de componentes destinados à construção. Embora a técnica da estereolitografia tenha sido comercialmente introduzida em 1987 (STACEY et al., 2004), sua implementação no processo de projeto continua lenta e gradual.

O nome “Protótipo Rápido” refere-se à economia de tempo com a automatização do processo sem intervenção humana, ou à ferramenta empregada para criar um objeto para avaliação como parte de um processo (BUSWELL et al., 2007). Apesar de o nome sugerir rapidez, dependendo da técnica de fabricação e da complexidade do modelo, pode-se levar um tempo considerável para confeccioná-lo.

Recentes pesquisas realizadas sobre fabricação digital de maquetes têm renovado o interesse a respeito dos diversos meios de representação e simulação em arquitetura. Na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo Mackenzie, o gru-

Protótipos rápidos ampliam a percepção de espaço por meio do toque físico. Torna-se mais fácil distinguir diferentes conformações geométricas complexas tateando e girando esses artefatos diante dos olhos. Por melhor que seja a imagem na tela e a capacidade de processar e mostrar imagens em tempo real, com definições convincentes de sombras e cores, os modelos feitos no ambiente virtual estão distantes daquilo que se pode considerar “natural”.

5 Experimentações analógico-digitais

Foram realizados três pequenos experimentos, com diferentes níveis de complexidade formal-espacial. Todos foram modelados e manipulados topologicamente no programa Form.Z.

Após ter criado o modelo digital 3D das formas, essas foram desdobradas pela técnica *unfolding*, a qual permitiu desdobrar e projetar os vários planos que compõem as configurações em um único desenho bidimensional. A maquete física inicial foi obtida desse desenho, que foi impresso, recortado e dobrado manualmente. Isso permitiu a execução de uma maquete inicial na escala 1:200, e após algumas correções do projeto, uma final em 1:100.

A maquete inicial (Figura 1, parte superior) e o seu terreno em escala 1:200 foram gerados por meio da dobradura de um desenho criado e impresso pela técnica *unfolding*, e a final na parte inferior, em 1:100, executada em papel duplex, também foi gerada pelo mesmo método.

No segundo modelo, a proposta era criar formas mais complexas (Figura 2). Os vértices e arestas de cada um dos volumes foram movidos no espaço. A finalidade dessa manipulação topológica foi criar uma forma plasticamente mais dinâmica, de modo a romper com a rigidez e regularidade dos prismas regulares iniciais.

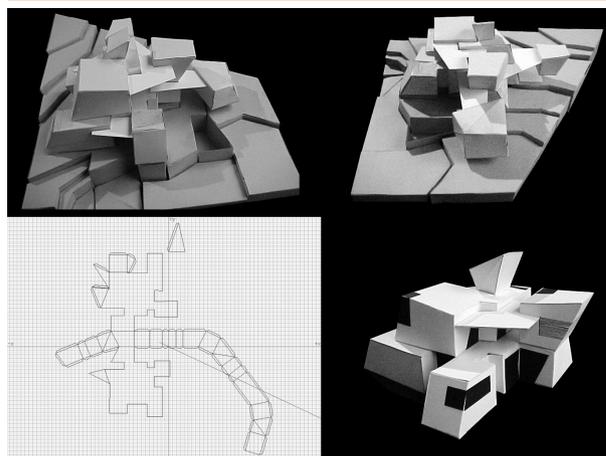


Figura 1: Fotos dos modelos físicos realizados manualmente pela técnica unfolding

Fonte: Florio, 2005.

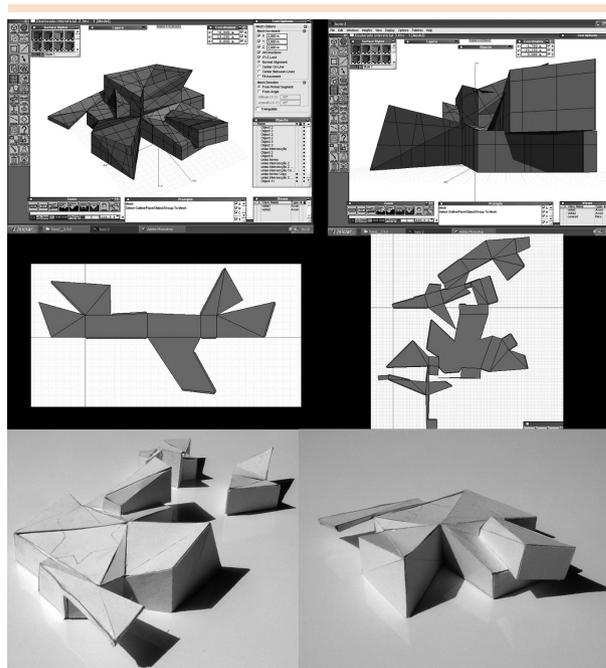


Figura 2: Etapas da elaboração do segundo experimento

Acima, imagens do modelo no programa Form.Z. No centro, as superfícies desdobradas pelo *unfolding*. Abaixo, fotos dos modelos físicos montados manualmente.

Fonte: Florio, 2005.

O terceiro pequeno experimento (Figura 3) começou com o desenho de um sólido regular (18 x 3 x 3 metros), e após ser convertido em malha (*mesh*), teve início a manipulação topológica de seus vértices e arestas. O segundo e terceiro volumes foram

“aninhados” ao primeiro, de modo a “esculpir” por operações booleanas. Como nos dois anteriores, o modelo 3D foi desdobrado pela técnica do *unfolding*, impresso e recortado em papel duplex.

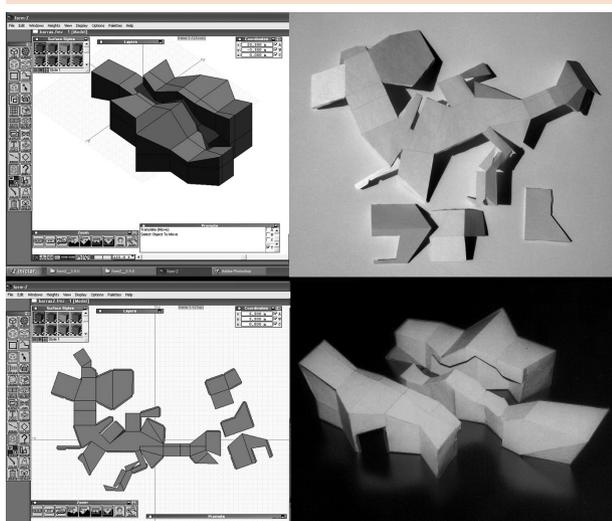


Figura 3: Imagens da confecção do terceiro experimento

Acima e abaixo à esquerda são mostradas imagens do modelo digital 3D e do desenho 2D, obtidos pela técnica *unfolding*. Na parte superior e inferior à direita da foto apresenta-se o modelo físico antes e depois da montagem.

Fonte: Florio, 2005.

A sequência desses experimentos permitiu analisar a diferença entre visualizar o modelo no plano virtual, na tela do monitor de vídeo, e no físico, concreto. Neste último, ele é muito mais tangível, ou seja, pode ser tocado e deslocado no espaço em tempo real, permitindo mais rapidamente compreender relações espaciais de vários pontos de vista. Embora a modelagem digital seja primordial para gerar toda a geometria complexa com precisão, o modelo físico proporcionou um senso de realidade e de percepção plena daquilo que estava sendo projetado.

A interação direta com os artefatos por meio das mãos intensifica a cognição espacial e promove a imersão do sujeito no projeto, permitindo-lhe desempenhar o raciocínio visual-espacial de modo mais eficiente.

6 Experimento de fabricação de maquetes por corte a laser

Os autores produziram componentes planares pela técnica de fabricação digital denominada *laser cutting*. A intenção foi tornar tangível a análise de projetos residenciais do arquiteto Frank Lloyd Wright, de modo a intensificar a experiência tátil e conciliá-la à análise visual dos projetos. Como um meio complementar, esses modelos físicos fabricados tornam possível uma análise mais profunda sobre os projetos analisados graficamente e por modelos digitais 3D.

A intenção nesta pesquisa não é sugerir que o ideal seria projetar apenas por meio de protótipos rápidos, mas de usar esses artefatos como meio complementar a outros já utilizados, como esboços e modelos físicos e digitais.

Para materializar um modelo fisicamente pela *laser cutter*, deve-se seguir sete etapas: 1. gerar o desenho 2D no CAD de todos os componentes, separadamente; 2. separar por *layers* e cores quais componentes serão cortados e/ou quais serão “vincados” apenas superficialmente; 3. diagramar os componentes em pranchas, respeitando o tamanho máximo compatível com a máquina de corte a *laser*; 4. ajustar a máquina de acordo com o material a ser utilizado, limpar a lente, ajustar o foco do *laser* – detalhes podem ser vistos na Digital Design Group (2006); 5. configurar os parâmetros no programa gráfico (AutoCad ou similar) como se fosse “plotar” o arquivo, designando a potência do raio *laser*, e enviar o arquivo para a máquina executar a tarefa; 6. a máquina executa os cortes e vincos nas peças; 7. montagem manual dos componentes em três dimensões.

Esta pesquisa teve origem nas análises de residências do arquiteto norte-americano Frank Lloyd Wright (TAGLIARI, 2008). Para a fabrica-

ção digital foram selecionadas oito residências da fase denominada *usonian houses*.

O desenho das elevações dos edifícios foi realizado no programa AutoCAD. O arquivo enviado para a cortadora a *laser* segue uma configuração similar a de uma plotagem. A diferença está no fato de que no lugar de configurar as espessuras das penas, configura-se a potência com que o *laser* irá atingir o suporte, permitindo que ele seja vincado ou cortado. Nos experimentos realizados, foi determinado que os componentes do edifício fossem cortados no papel, que possui uma espessura compatível com a escala pretendida, além da facilidade de dobrar e colar, propiciando ao mesmo tempo a rigidez necessária para a montagem do modelo volumétrico.

O processo de corte a *laser* requer a preparação de desenhos bidimensionais para construir modelos tridimensionais. Assim, iniciou-se com o desenho de todas as elevações de cada residência no programa AutoCAD. Como a cortadora a *laser* permite frisar ou cortar os materiais, os desenhos foram divididos em duas camadas (*layers*). A de cor laranja indica quais as partes que seriam frisadas (Figura 4, acima à esquerda). A outra cor para indicar quais as linhas que seriam cortadas. Nas residências analisadas, os frisos nas elevações correspondiam à modulação das tábuas de madeira e no caso da planta sua modulação, a indicação da localização das paredes e aberturas, como indicação para posterior montagem.

As elevações e plantas foram inseridas e diagramadas em uma folha de papel madeira tamanho A1, que corresponde ao máximo da área de trabalho na máquina (Figura 4).

Devido à quantidade de pequenas peças planas cortadas, as correspondentes às elevações foram desenhadas em planos rebatidos e mantidas juntas, ao mesmo tempo em que os desenhos da residência eram analisados. Cuidados especiais tiveram de ser tomados com relação às peças cor-

respondentes às esquadrias (portas e janelas), pois além de serem frágeis, teve-se de retirar os vãos correspondentes aos vidros e separá-los de outros elementos construtivos para que não fossem confundidos com eles. Para tanto, foi fundamental montar uma elevação de cada vez, de maneira sequencial, e percorrer o perímetro da residência com cautela, sem deixar nenhum elemento para trás, pois encontrar sua posição poderia ocasionar grande perda de tempo. Como já havia alertado Oh et al. (2006), o aspecto inconveniente desse processo é montar um objeto que foi desenhado por outra pessoa, pois a quantidade de peças e sua correta posição requerem atenção redobrada.

O tempo de execução da cortadora foi em média 10 minutos. O tempo varia de acordo com o número de entidades a serem frisados e/ou cortadas. O que determina se o *laser* irá cortar ou vincar é a potência do seu raio. A velocidade também depende do tipo de material.

Observou-se que os vincos, por serem superficiais, ficaram menos chamuscados que as áreas de corte. Os cortes são muito precisos, mesmo em peças de tamanho reduzido (Figura 5). Podem-se executar detalhes e pormenores com bastante precisão, o que facilita enormemente o trabalho de criação de maquetes físicas.

Antes da montagem tomou-se o cuidado de manter as peças cortadas correspondentes a cada elevação separadas (Figura 5), pois se fossem misturadas incorreria na difícil tarefa de verificar e separar peça por peça e identificar sua localização correta.

A sequência de fotos das maquetes mostra a montagem manual, passo a passo (Figuras 4 e 5). As elevações foram montadas sequencialmente. As pequenas peças foram coladas umas às outras com cola branca. Durante a montagem notou-se que algumas partes estavam empenadas, dificultando a justaposição com as demais. No caso de papel madeira, aconselha-se não deixá-lo receber umi-

dade, pois acarreta deformações difíceis de serem corrigidas. O tempo de montagem das maquetes varia entre duas e três horas, e depende fundamentalmente da escala, do número total de componentes, da sua fragilidade e da atenta observação dos detalhes do edifício. Algumas peças ficaram chamuscadas nas áreas de corte, especialmente em razão do manuseio incorreto do papel madeira causado por suas ondulações as quais prejudicaram o corte perfeito. No entanto, acelera o processo de corte e montagem de maquetes. Assim, recomenda-se um acabamento manual para maquetes de apresentação.

Os resultados alcançados até o momento permitem afirmar que apesar de limitações em sua fabricação, os PRs obtidos por corte a *laser* contribuem para melhorar substancialmente a interpretação e compreensão de projetos em arquitetura, em particular de detalhes de elementos construtivos. As restrições observadas dizem respeito à escala do artefato, a bidimensionalidade dos desenhos e dimensões da área de corte.

Cada elevação de cada uma das residências teve que ser cuidadosamente desenhada e pormenorizada, prevendo-se mudança de planos e profundidades, e considerando como as peças seriam cortadas, e após, montadas e coladas. A precisão do corte a *laser* impressiona, pois detalhes diminutos de caixilhos foram executados com perfeição. A justaposição das peças foi perfeita. O aspecto que mais atrapalhou foi o material utilizado (papel de 1 mm), que está sujeito a umidade e deformações.

Notou-se que pequenas falhas de desenho desencadeiam uma somatória de erros, uma vez que as peças justapostas podem deslocar a posição umas das outras. Contudo, embora não tenham um acabamento excelente, esses protótipos podem atender plenamente as necessidades dos arquitetos tanto na investigação do espaço, durante o pro-

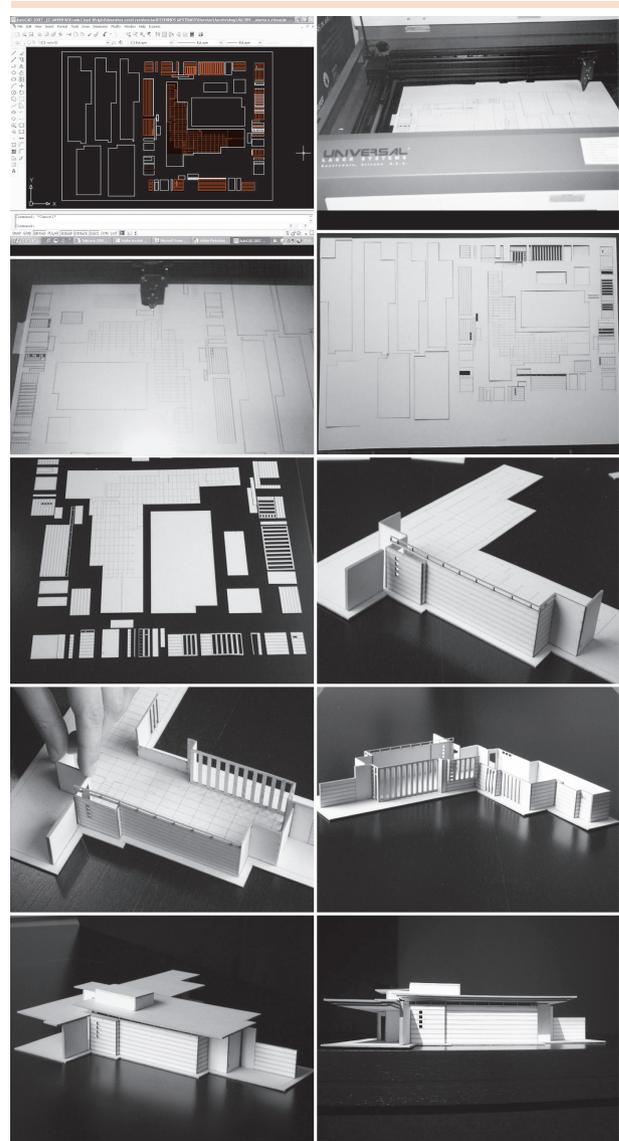


Figura 4: Residência Jacobs, projetada por Frank Lloyd Wright

Desenho no AutoCad. Foto na cortadora a *laser*; prancha após a finalização do corte; as peças antes da montagem; montagem sequencial

Fonte: Os autores.

cesso projetual, como na sua análise de projetos de outrem.

Modelos físicos e protótipos rápidos podem ser desmontados para revelar seu interior e seus componentes (Figura 6). A quantidade de detalhes incorporados no modelo físico depende da escala e de sua função. Entretanto, a simplificação é, muitas vezes, necessária em benefício de uma melhor compreensão daquilo que está ali representa-

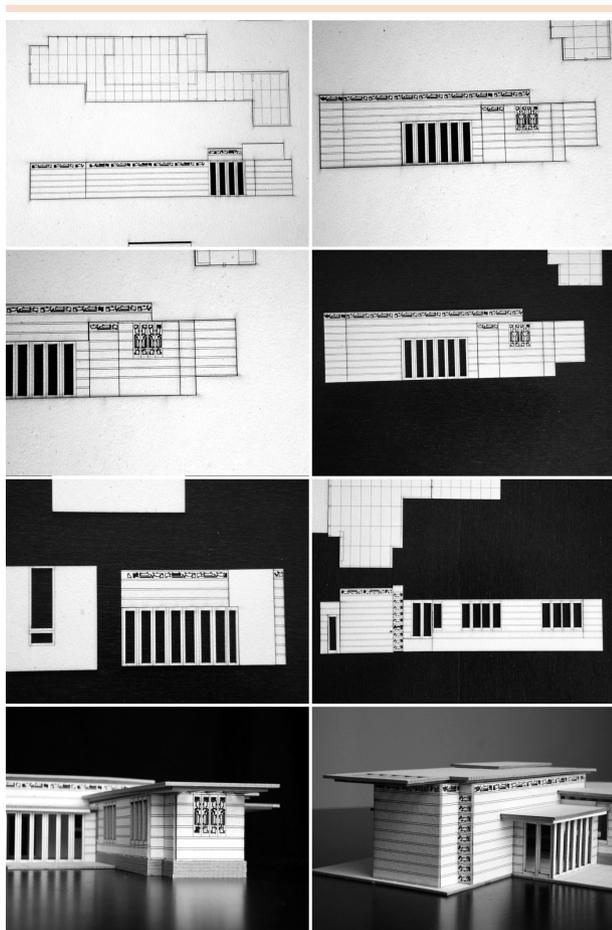


Figura 5: Residência Pope, projetada por Frank Lloyd Wright

Cada elevação foi posicionada com todos os seus componentes. Nestas fotos, podem-se notar as aberturas (portas e janelas) com detalhes muito pequenos, executados com precisão de décimos de milímetro pelo *laser cutter*.

Fonte: Os autores.

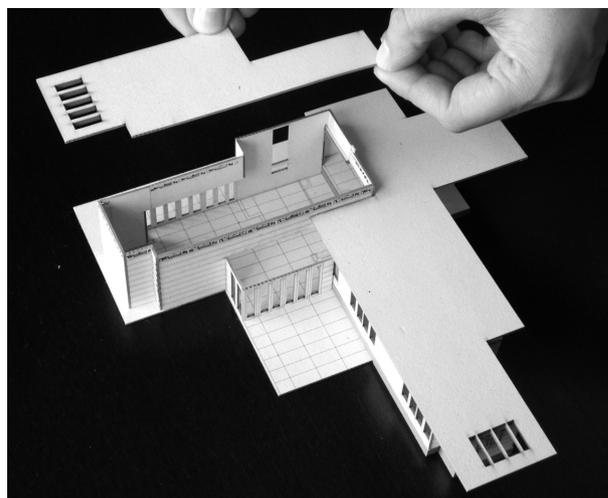


Figura 6: Residência Pope

Resultado obtido pela fabricação por corte a *laser*.

Fonte: Os autores.



Figura 7: Residência Winkler

Resultado obtido pela fabricação por corte a *laser*.

Fonte: Os autores.

do (FLORIO et al., 2007). Assim, nos protótipos rápidos realizados, alguns aspectos do edifício foram abstraídos para que os detalhes ficassem em evidência na escala pretendida. (Figura 7).

7 Resultados e discussões

No contexto de análise projetual, a intenção com esses experimentos foi estudar a importância da tangibilidade proporcionada pelos protótipos rápidos, assim como sua contribuição no processo de análise de obras de arquitetura.

Protótipos rápidos não podem ficar restritos a uma produção de modelos bonitos, bem acabados destinados à apresentação (CELANI et al., 2007). Eles atendem principalmente ao propósito de visualização e podem ajudar na compreensão dos espaços projetados durante o processo criativo e, sobretudo, na fabricação digital de elementos destinados a construção. Ao materializar desenhos, além da visão, atuarão todos os outros sentidos que fazem o arquiteto perceber e entender fisicamente o ambiente circundante.

Embora os acabamentos não representem um aspecto importante nesta pesquisa, os protótipos

rápidos produzidos pela técnica de corte a *laser* podem servir como artefatos para concepção e também para apresentação.

É importante aplicar estratégias que envolvam artefatos produzidos por processos analógicos e digitais, de modo a promover discussões não apenas em relação das vantagens e desvantagens de cada meio, mas também dos aspectos que caracterizam suas diferenças e complementaridades.

Diante da inevitável onipresença das novas tecnologias e de sua importância no campo teórico e no prático da arquitetura contemporânea, torna-se fundamental a compreensão do papel do modo de fabricação digital nas diversas fases do projeto e da construção.

Por fim, os resultados obtidos até o atual momento permitem afirmar que a apreciação de projetos por meio de protótipos rápidos é muito eficaz, possibilitando materializar e pormenorizar a análise (literalmente dividir em partes) decompondo e recompondo o objeto bi e tridimensionalmente.

Embora a fabricação digital esteja longe de ser implementada de forma plena em um país como o Brasil, no qual a tecnologia da informação é ainda marginal no contexto da produção de componentes de edifícios, vê-se a oportunidade de investir em tecnologias que ajudem a superar os graves problemas relativos tanto à qualidade dos projetos e da construção, como à sua viabilidade técnica, com custos e prazos mais eficientes.

8 Conclusões

O objetivo dos autores é contribuir no ensino-aprendizagem dos futuros arquitetos, estimulando-os a desenvolverem suas habilidades no processo de projeto em arquitetura por meio da interação entre as técnicas tradicionais – tais como modelos físicos e desenhos –, os modelos digitais 3D e os protótipos rápidos.

Algumas vantagens dos protótipos rápidos sobre o modo de produção manual de fabricar modelos físicos são evidentes. No entanto, cabe aos educadores promover um desenvolvimento de habilidades e conhecimentos nos estudantes por meio da hibridação e integração entre o analógico e o digital, destacando a potencialidade de cada meio e de cada ferramenta para o pleno desenvolvimento das ações cognitivas realizadas durante o processo de projeto.

Como pesquisas futuras pretende-se desenvolver encaixes que possibilitem eliminar a necessidade de cola, facilitando a montagem, assim como utilizar a técnica do *unfolding* para gerar desenhos para serem cortados pela *laser cutter*.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao LAPAC da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

Notas

- 1 Este artigo foi originalmente publicado pelos autores nos Anais do Congresso Internacional SIGRADI, em Havana, Cuba, sob o título “O uso da cortadora a laser na fabricação digital de maquetes físicas”.

Referências

- BLUST, R.; BATES, J. B. Activity Based Learning – Wagons R Us – A Lean Manufacturing Simulation, in American Society for Engineering Education, ASEE. In: ANNUAL CONFERENCE AND EXPOSITION: ENGINEERING EDUCATION REACHES NEW HEIGHTS, Salt Lake City. Proceedings... Sal Lake City, June 2004.
- _____; WIGGINS, G. Kinds of seeing and their functions in designing. *Design Studies*, v. 13, n. 2, p.135-156, 1992.
- BREEN, J.; NOTTROT, R.; STELLINGWERFF, M. Tangible virtuality – perceptions of computer-aided and physical modeling. *Automation in Construction*, v. 12, p. 649-653, 2003.

- BURRY, M. Handcraft and machine metaphysics. In: INTERNATIONAL EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, ECAADE, Leuven, Proceedings... Leuven, 1998.
- BURRY, M. Rapid Prototyping, CAD/CAM and human factors. *Automation in Construction*, v. 11, p. 313-333, 2002.
- BUSWELL, R. A.; SOAR, R. C.; GIBB, A. G. F.; THORPE, A. Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. *Automation in Construction*, v. 16, p. 224-231, 2007.
- CELANI, M. G. C.; PINHEIRO, E.; GRANJA, A. D. Lean thinking and rapid prototyping: towards a shorter distance between the drawing board and the construction site. In: VIRTUAL AND RAPID PROTOTYPING 2007, Leiria. Proceedings... Leiria, 2007.
- CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. Rapid prototyping: principles and applications. Singapore: World Scientific Publishing, 2003.
- DIGITAL DESIGN FABRICATION GROUP. "How to use the Laser Cutter". Disponível em: <http://ddf.mit.edu/devices/Laser_Cutter_Tutorial_Detailed.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2008.
- FLORIO, W. O uso de ferramentas de modelagem vetorial na concepção de uma arquitetura de formas complexas. 2005. 477 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo FAUUSP, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2005.
- FLORIO, W.; SEGALL, M. L.; ARAUJO, N. S. A Contribuição dos protótipos rápidos no processo de projeto em Arquitetura. In: VII INTERNATIONAL CONFERENCE ON GRAPHICS ENGINEERING FOR ARTS AND DESIGN. Anais do Graphica 2007, Curitiba: UFPR, 2007.
- GIANNATSIS, J.; DEDOISSIS, V.; KARALEKAS, D. Architectural scale modeling using stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, v. 8, n. 3, p. 200-207, 2002.
- GIBSON, I.; KVAN, T.; MING, L. W. Rapid prototyping for architectural models. *Rapid Prototyping Journal*, v. 8, n. 2, p. 91-99, 2002.
- HERBERT, D. M. Graphic processes in architectural study drawings. *Journal of Architectural Education*, v. 46, n. 1, p. 28-39, 1992.
- KENDIR, E. Prêt-à-Construire: an educational inquiry into computer aided fabrication. In: 10th IBEROAMERICAN CONGRESS OF DIGITAL GRAPHICS, SANTIAGO DE CHILE, SIGRADI, Proceedings... Santiago, Chile, 2006, p. 162-165.
- MCCULLOUGH, M. Abstracting craft: the practiced digital hand. Cambridge: The MIT Press, 1996.
- MOODEN, T. CADCAMing: the use of rapid prototyping for the conceptualization and fabrication of architecture. *Automation in Construction*, v. 14, p. 215-224, 2005.
- OH, Y. et al. The designosaur and the furniture factory. In: J. S. GERO (ed.), DESIGN COMPUTING AND COGNITION'06, Netherlands, Proceedings... Netherlands: Springer, 2006, p. 123-140.
- PALLASMAA, J. The eyes of the skin: Architecture and the senses. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
- PETRIC, J.; MAVER, T. Digital Prototyping in the Architectural Design Studio. In: 7th IBEROAMERICAN CONGRESS OF DIGITAL GRAPHICS, SIGRADI, 2003, Proceedings... Rosário, p. 190-192.
- RYDER, G. et. al. Rapid design and manufacture tools in architecture. *Automation in Construction*, v. 11, p. 279-290, 2002.
- SASS, L.; MICHAUD, D.; CARDOSO, D. Materializing a design with plywood. In: INTERNATIONAL EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE, ECAADE 25, 2007, Frankfurt. Proceedings... Frankfurt, Germany, p. 629-636, 2007.
- SCHÖN, D. Educando o profissional reflexivo: um novo design para o ensino e a aprendizagem. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 2000.
- SEELY, J. C. K. Digital fabrication in the architectural design process. M. S. Thesis, Depto. Architecture Studies, Massachusetts Institute of Technology, MIT, Massachusetts, 2004.
- SHIH, N-J. RP-aided computer modeling for architectural education. *Computers & Graphics*, v. 30, p.137-144, 2006.
- SIMONDETTI, A. Computer-generated physical modeling in the early stages of the design process. *Automation in construction*, v. 11, p. 303-311, 2002.
- STACEY, M.; BEESLEY, P.; HUI, V. Digital fabricators. Waterloo: University of Waterloo School of Architecture Press, 2004.
- TAGLIARI, A. M. Os princípios orgânicos na obra de Frank Lloyd Wright: uma abordagem gráfica de exemplares residenciais. 2008. Dissertação (Mestrado em Artes) – Instituto de Artes, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- WANG, Y.; DUARTE, J. P. Automated generation and fabrication of designs. *Automation in Construction*, v. 11, p. 291-302, 2002.
- WELCH, R.; KLOSKY, J. L. An online database and user community for physical models in the engineering classroom. *Advances in Engineering Education*, v. 1, n. 1, p.1-25, 2007.

Recebido em 13 out. 2010 / aprovado em 12 abr. 2011

Para referenciar este texto

FLORIO, W. TAGLIARI, A. Fabricação digital de maquetes físicas: tangibilidade no processo de projeto em Arquitetura. *Exacta*, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 125-136, 2011.