



Protótipos rápidos de coberturas complexas em arquitetura: comparação entre os processos FDM e 3D printer

Wilson Florio, Prof. Dr.
Nieri Soares de Araújo, Prof. Msc.
Mario Lasar Segall, Prof. Msc.

Resumo. O objetivo deste artigo é relatar dois experimentos realizados pelos autores na produção de protótipos rápidos (PR) de coberturas pelos processos FDM e 3D Printer. A comparação entre diferentes processos de prototipagem rápida é fundamental para orientar futuras ações não apenas com relação à hibridação de técnicas de PR, mas entre artefatos fabricados digitalmente e artefatos produzidos manualmente. Dentro do contexto de análise projetual, e sob a ótica do processo de projeto em arquitetura, a intenção desses experimentos foi estudar a importância da tangibilidade que é proporcionada pelos protótipos rápidos. Protótipos rápidos apresentam uma oportunidade para experimentação e descoberta. Além de auxiliar na visualização, podem aprofundar a compreensão dos espaços projetados durante o processo criativo. Embora haja sérias restrições na produção de elementos delicados, os PRs contribuem para a investigação de formas e espaços complexos. O artigo contribui para promover discussões não apenas em relação das vantagens e desvantagens de cada meio, mas dos aspectos que caracterizam suas diferenças e complementaridades.

Palavras-Chave. Prototipagem Rápida, Fabricação Digital, Processo de Projeto, Corte a laser, Modelos físicos.

I. INTRODUÇÃO

A crescente complexidade de edifícios nos últimos anos tem sido um dos fatores que impulsionou o uso de modelos físicos e digitais em arquitetura. Em nossas atividades didáticas notamos que coberturas de grandes edifícios, cuja geometria é curvilínea e complexa, acarretam dificuldades de

representação e de compreensão do projeto. Por conseguinte nota-se que tais formas demandam o uso de programas gráficos para auxiliar na definição geométrica de suas configurações.

Embora modelos geométricos digitais facilitem a investigação e visualização dos espaços projetados, modelos físicos podem ser manuseados e desmontados para revelar seu interior e seus componentes, tornando mais tangível a compreensão de formas, espaços e sistemas técnicos construtivos.

A representação física de um modelo digital é fundamental para a correta avaliação do projeto de arquitetura, pois permite materializá-la. As recentes pesquisas realizadas a respeito da fabricação digital de modelos e maquetes têm renovado o interesse a respeito dos diversos meios de representação e simulação em arquitetura. Nesse âmbito estão os protótipos rápidos (PRs), que cumprem o papel de traduzir arquivos CAD 3D em modelos físicos. A materialização de projetos por meio de PRs torna mais tangível a compreensão da proposta arquitetônica. O objetivo deste artigo é relatar alguns experimentos realizados pelos autores na produção de maquetes a partir de modelos geométricos digitais.

A presente pesquisa procura compreender os aspectos de complementaridade existentes entre o meio analógico e o digital, por meio do uso de hibridação entre artefatos produzidos manualmente e protótipos rápidos fabricados por processo digital.

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, de dois experimentos envolvendo coberturas e estruturas complexas a partir de critérios geométricos e econômicos, que inclui modulação e superfícies regradas. Utilizamos o processo de prototipagem aditivo, isto é, por sobreposição de camadas, para realizar os experimentos e obter os modelos reais tridimensionais. Comparamos o processo FDM (Fused Deposition Modeling, da Stratasys), que utiliza resina ABS com a impressora 3D (3D Printer, da Z Corporation), que utiliza pó. São apontadas vantagens e desvantagens de ambos os processos na produção de coberturas complexas.

A intenção é despertar o interesse na discussão a respeito dos meios de representação, particularmente o papel que eles assumem nas ações cognitivas realizadas durante o processo projetual, salientando a possibilidade de utilizar o protótipo rápido como um meio de renovar o interesse dos profissionais e de estudantes de arquitetura por modelos físicos. Estudamos a cooperação entre os diversos meios de expressão e sua integração para desenvolver novas possibilidades no processo criativo. Portanto, o artigo contribui para a discussão em torno de procedimentos projetuais que possam aperfeiçoar tanto a metodologia de projeto como a comunicação de idéias entre diferentes profissionais na área da arquitetura.

Os resultados obtidos até o presente momento permitem afirmar que apesar de limitações em sua fabricação, os PRs contribuem para melhorar substancialmente a comunicação do projeto elaborado, particularmente de superfícies curvilíneas complexas. As maiores restrições se devem tanto a geometria adotada e limitações das máquinas como dos materiais empregados.

II. O PROCESSO DE PROJETO

Projeto é uma interação de fazer e ver, fazer e descobrir [1]. Assim, as representações e simulações analógicas e digitais assumem o papel *ativo* no processo de projeto, pois colaboram para tornar explícito aquilo que está implícito na mente de quem está projetando, diminuindo a carga cognitiva e ao mesmo tempo facilitando a geração de novas idéias.

Projetar é uma atividade durante a qual o arquiteto desenvolve ações de acordo com as mudanças em seu meio ambiente. Observando e interpretando os resultados de suas ações, ele então decide sobre novas ações a serem executadas sobre o meio. Isto significa que os conceitos dos arquitetos mudam de acordo com aquilo que eles estão 'vendo' [2] em suas próprias representações externas. Esta interação entre o arquiteto (ou estudante de arquitetura), o meio ambiente e os registros gráficos determina fortemente o curso do projeto. Esta idéia é chamada de ação situada, *situatedness*. A noção de ação situada é usada para descrever como processos projetuais que conduzem a diferentes resultados dependem de experiências únicas do arquiteto.

A representação física de um modelo digital é fundamental para a correta avaliação do projeto de arquitetura, pois permite materializá-la. A materialização de projetos por meio de PRs torna mais tangível a compreensão da proposta arquitetônica.

Idéias emergem a partir do ato físico de desenhar [3], onde cada registro exige uma nova interpretação do registro anterior. As descobertas circunstanciais, definidas muitas vezes como "insights", são contingentes, emergem do próprio ato projetual e não de decisões antecipadas. Os modelos físicos tornam tangível a compreensão de relações formais e espaciais, facilitando a interação com o artefato pelo contato físico, tanto pelo tato como pela visão.

Embora eles normalmente tenham uma função puramente representativa, os PRs são altamente atraentes para experimentar alterações no projeto durante sua concepção. Isso ocorre porque as mudanças nos protótipos virtuais podem ser rapidamente transmitidas para novos protótipos rápidos, especialmente com o objetivo de avaliar e comparar propostas. Em arquitetura os PRs servem tanto para a testar, compreender, sintetizar e avaliar a proposta arquitetônica, em seus múltiplos aspectos, como para comunicar facilmente as intenções projetuais.

III. ANTECEDENTES

Os PRs podem ser obtidos a partir de três tipos de processos: as cortadoras, por subtração ou 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 a partir de remoção de material por meio de ferramentas em máquinas por controle numérico (CNC). No processo aditivo são adicionadas camadas de matéria, normalmente resinas. Assim, PRs são convenientes para a fabricação tanto de elementos regulares como complexos, sobretudo na fabricação de formas irregulares, de difícil confecção manual.

Recentes pesquisas realizadas sobre fabricação digital de maquetes têm renovado o interesse a respeito dos diversos meios de representação e simulação em arquitetura. Na Universidade Presbiteriana Mackenzie, o grupo de pesquisa liderado por um dos autores tem conduzido pesquisas a respeito de prototipagem rápida desde 2007 [4]. Na UNICAMP, o grupo de pesquisa liderado pela professora Gabriela Celani tem realizado importantes pesquisas no LAPAC. No âmbito internacional há pesquisadores voltados à área de arquitetura [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11] e [12].

De acordo com Chua (2003) [11], os papéis que os protótipos rápidos podem desempenhar no projeto são: a) Experimentação e aprendizado (solução de problemas); b) Testar e provar (hipóteses durante a fase de concepção); c) Comunicar e interagir (compreensão tátil e interação com o projeto do designer); d) Síntese e integração (reunião dos componentes); e) Programar e produzir (fases e planejamento da execução).

Um modo mais bem sucedido de gerenciar projetos complexos seria fazer os projetos por meio de objetos 3D reais a fim de inspecionar sua composição como um todo, minimizando a possibilidade de perder informação como acontece quando inspecionamos um modelo apenas por seções. Protótipos rápidos vão um passo adiante para mostrar como as partes estão conectadas logicamente entre si [13].

Há vários exemplos do uso de protótipos rápidos na arquitetura contemporânea, tanto para experimentar como para apresentar idéias. Arquitetos como Zaha Hadid, Thom Mayne, Frank Gehry, Norman Foster, Greg Lynn, Renzo Piano, Ali Rahim entre outros têm apresentado diferentes versões de seus projetos por meio de modelos físicos, o que inclui os protótipos rápidos (fig. 1).

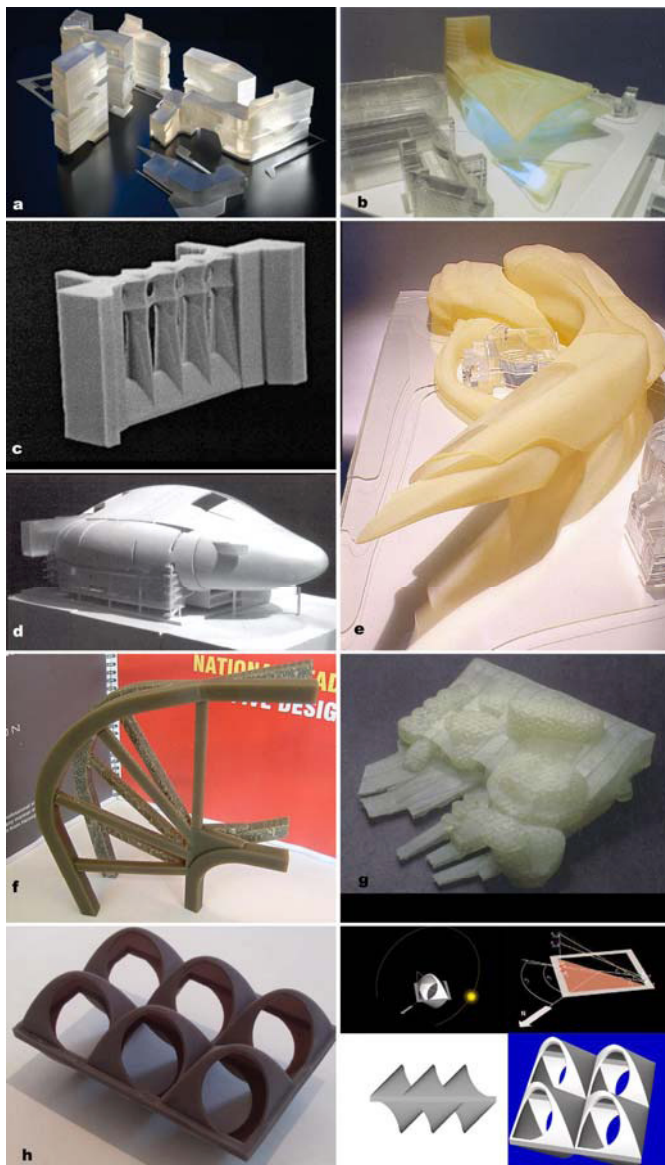


Figura 1. Protótipos rápidos com as técnicas estereolitografia, depósito de cera, FDM e 3D Printer,. Arquitetos: Zaha Hadid (1a, 1b e 1e), Mark Burry (1c), Thom Mayne (1d), Herzog & de Meuron (1f), Greg Lynn (1g) e Renzo Piano (1h). Fonte:

Burry (2002) [14] começou a utilizar protótipos rápidos a partir do ano 2000 para fabricar componentes da “Sagrada Família” (fig. 1c), projetada por Antoni Gaudi em Barcelona. Logo o arquiteto percebeu as vantagens na fabricação digital com relação a modelagem e fabricação de peças de geometria complexa. Mas diante de sua experiência no canteiro, e na convivência com artesãos, que descobriram que fazer protótipos manualmente, e com rapidez, Burry alertou sobre o potencial risco de diminuir ou perder as habilidades manuais.

O professor sugeriu um “casamento saudável” entre técnicas automatizadas pela fabricação digital e as tradicionais técnicas manuais, tanto para fins de representação como para a construção.

Com relação ao projeto “The Nasher Sculpture Center” em Dallas, projetado pelo escritório Renzo Piano Building Workshop, Stacey escreveu: O programa de modelagem 3D produziu sofisticadas renderizações, mas isto não foi suficiente para explorar totalmente a geometria. Assim, Arup investiu em protótipos rápidos (fig. 1f). Assim, protótipos físicos precisos em escala real puderam ser produzidos diretamente de modelos computacionais 3D em horas [15].

Protótipos rápidos facilitam a comunicação e a troca de idéias entre a equipe de profissionais e o cliente, facilitam o estudo de geometrias complexas em todas as etapas do projeto.

Especialmente em projetos complexos, protótipos rápidos aguçam o controle pelo toque físico. Na pesquisa realizada por Shih (2006, p.143) [13], a influência não foi meramente no nível de realidade, mas também sobre aquilo que deu aos estudantes um senso de controle sobre as formas que estavam sendo criadas.

Há bons exemplos no uso de protótipos rápidos na exploração de objetos tangíveis destinados à construção civil. A pesquisa realizada por Behrokh Khoshnevis (2005) [16], da University of Southern Califórnia. A técnica desenvolvida pelo professor foi denominada “Contour Crafting”, que ajuda a produzir estruturas em grandes dimensões usando materiais cerâmicos. No caso do Brasil esta técnica seria de grande interesse, pois pode viabilizar construções para habitações de baixa renda, habitações para situações de emergência, assim como para construções com arquitetura sustentável.

IV. METODOLOGIA

Todo o processo teve início com a modelagem digital tridimensional. Após ter finalizado o modelo 3D sólido no programa Rhinoceros, os arquivos foram exportados no formato stl. O formato STL tem sido adotado como um padrão para a indústria de prototipagem rápida.

Este formato, disponível na maior parte dos programas gráficos atuais, representa a superfícies dos objetos como uma malha de triângulos planos co-planares. Uma vez que tais elementos planos não podem representar com exatidão superfícies curvas, tem-se que aumentar o número de triângulos para melhorar a aproximação da suavidade, inevitavelmente resultando em um arquivo de tamanho maior [17].

A. Experimento 1

As pesquisas de Simondetti (2002) [8] e Wang & Duarte (2002) [9] apontam os protótipos rápidos como um meio adequado para representar formas de geometria complexa em arquitetura. Na mesma linha de pensamento, os autores conduziram experimentos para investigar projetos de

coberturas, aplicando superfícies regradas tais como parabolóides hiperbólicos. Neste 1º experimento utilizamos o processo de prototipagem aditivo, com a máquina FDM, Fused Deposition Modeling, da Stratasys, para obter os componentes físicos tridimensionais.

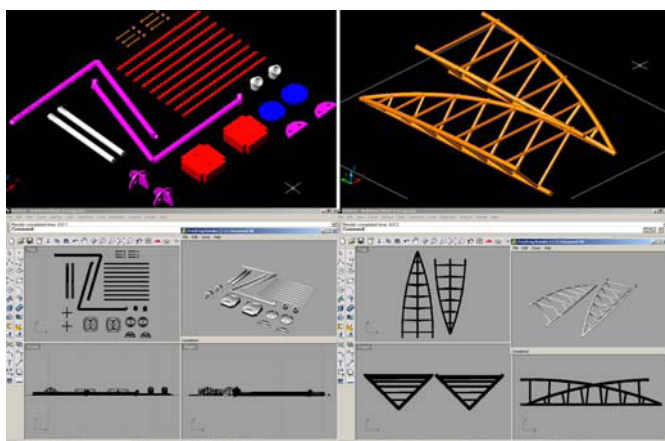


Figura 2. Os componentes desmontados da cobertura parabolóide hiperbólica e da treliça curvilínea foram modelados no programa Rhinoceros. Esses modelos digitais 3D foram fabricados pelo processo FDM e 3DPrinter. Fonte: Autores, 2008.

A configuração antes da fabricação das peças no programa Catalyst em máquinas FDM depende de 4 parâmetros fundamentais: 1. definição da altura da camada; 2. a qualidade de acabamento da peça; 3. o estilo do interior da peça; 4. o estilo da sustentação, ou seja, o suporte. Essas configurações ajustarão os parâmetros para todas as operações do pré-processamento: fatia, sustentação (suporte), e “toolpath” (aplicação da resina ABS).

Dados da prototipagem rápida

Modelo Parabolóide Hiperbólico – Técnica FDM

- Tempo de prototipagem = 3 horas e 26 minutos
- Modelo do suporte = P400_r
- Modelo do material = P400
- Consumo do suporte = 24,72 cm³
- Consumo da resina = 30,06 cm³
- Altura da camada = 0,3302 mm
- Característica de impressão = suporte e resina estrutura vazada (sparse)
- Status da camada = melhor qualidade horizontal

Modelo Treliça – Técnica FDM

- Tempo de prototipagem = 5 horas e 33 minutos
- Modelo do suporte = P400_r
- Modelo do material = P400
- Consumo do suporte = 43,46 cm³
- Consumo da resina = 10,06 cm³
- Altura da camada = 0,3302 mm
- Característica de impressão = suporte e resina estrutura vazada (sparse)
- Status da camada = melhor qualidade horizontal

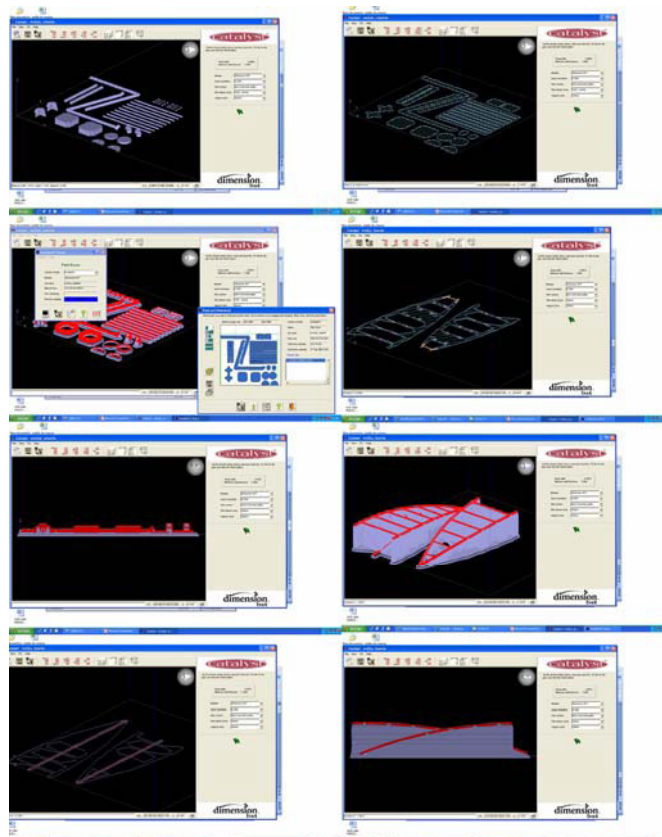


Figura 3. Nas fotos acima do experimento 1, as configurações sendo realizadas no programa Catalyst. Observa-se que a resina ABS é representada pela cor vermelha, enquanto que o suporte está na cor azul. Fonte: Autores, 2008.

No caso do modelo da treliça nota-se que pelo fato da peça ter uma curvatura, o programa projeta a estrutura de sustentação para que a peça seja fisicamente construída sobre uma base sólida. Isso ocasiona um consumo muito grande de material de suporte, que neste caso foi 4 vezes o da resina ABS.

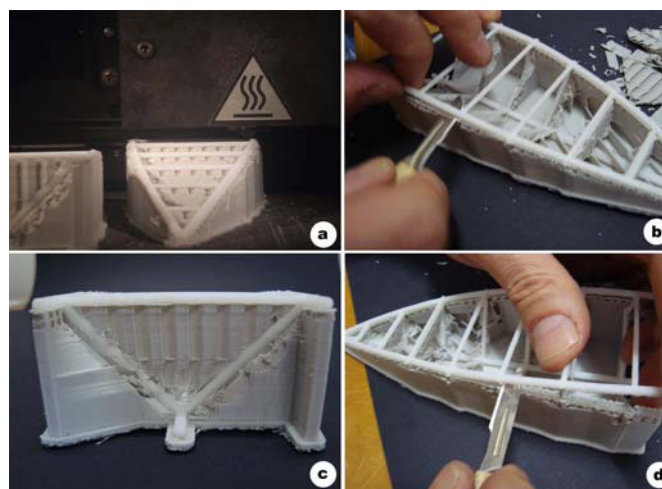


Figura 4. Experimento 1. Na foto 4a, a treliça em resina ABS sendo fabricada; Na foto 4b e 4c, nota-se a exagerada quantidade de material de suporte; Na foto 4d, a difícil separação do material do suporte da resina. Fonte: Autores, 2008.

Já no caso da fabricação dos componentes do parabolóide hiperbólico, o consumo de resina e de material de suporte ficaram próximos. Isto se deve ao fato de ter-se o cuidado de separar as peças e fabricá-las separadamente, exigindo menos suporte de sustentação.

Notou-se que a configuração do estilo do interior da peça no modo “sparse”, ou seja, vazada, provocou uma fragilidade dos componentes, particularmente da treliça, que durante a separação do suporte ocasionou rupturas indesejadas em partes da peça. Se tivesse sido configurado o estilo do interior da peça no modo “cheio” esse problema não ocorreria.

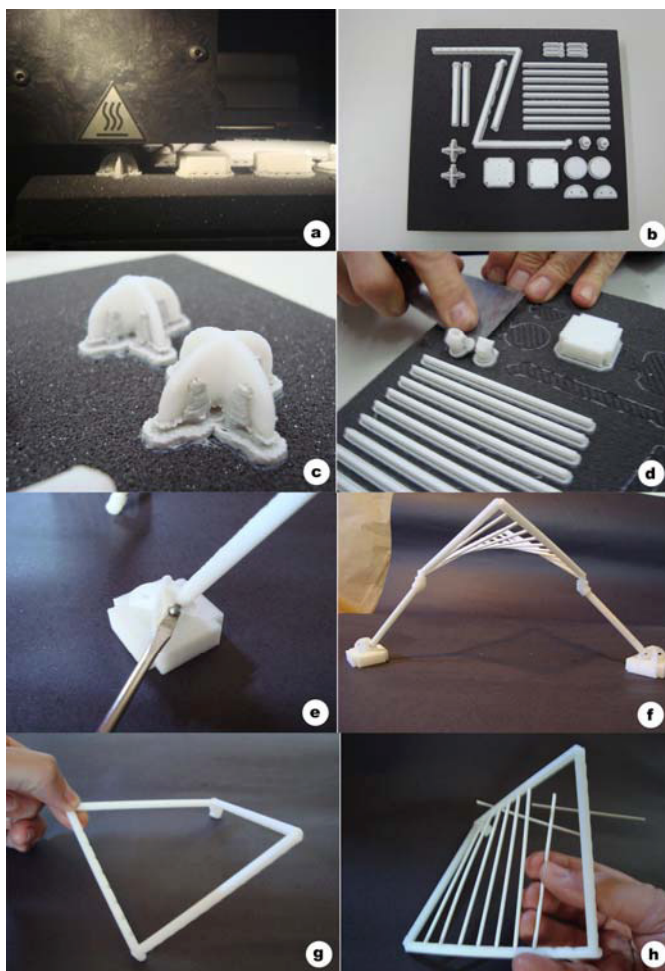


Figura 5. Experimento 1. Na foto 5a, as peças sendo fabricadas em ABS; Na foto 5b, as peças ainda na bandeja após serem fabricadas; Na foto 5c, detalhe do suporte suportando a peça na bandeja; Na foto 5d, a remoção das peças da bandeja com uma espátula; Na foto 5e, fixação por parafuso entre duas peças; Na foto 5f, cobertura parabolóide hiperbólica já montada; Na foto 5g, as peças que formam o perímetro da cobertura; Na foto 5h, as varetas de PVC de 2mm (estrutura híbrida). Fonte: Autores, 2008.

B. Experimento 2

Após o arquivo ter sido criado no programa Rhinoceros, este foi exportado em formato “stl” para o programa utilizado pela 3D Printer.

Para o melhor aproveitamento do espaço na área de prototipagem é necessário, em muitos casos, rotacionar as peças até que as mesmas fiquem restritas a um volume

máximo para impressão de 350 mm (c) x 250 mm (l) x 200 mm (h). Ao mesmo tempo deve-se estar atento a adequação de escala, configurando a espessura mínima do menor perfil em 2mm para extrusão.

Após os cuidados anteriores, o status do sistema fornece informações sobre o tempo de execução, consumo de pó, aglutinante (binder) e superfície de ciano acrilato (ex. bonder) para vedar os poros da peça.

A preparação do pó (substrato de gesso) na bandeja direita (reservatório) é realizada manualmente. Só assim pode-se enviar as informações do computador para a máquina.

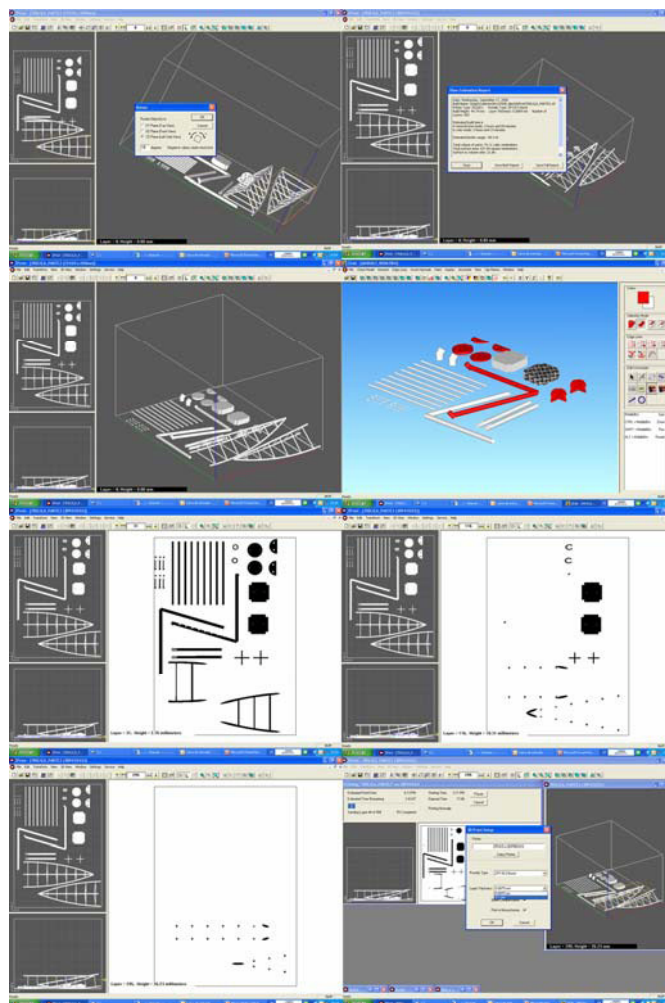


Figura 6. Experimento 2. Configurações com relação a rotação e posicionamento das peças, tempo de execução e consumo de materiais, imagens de camadas em várias alturas. Fonte: Autores, 2008.

A impressão 3D inicia quando o cartucho da impressora deposita o líquido (aglutinante) sobre a superfície da bandeja de impressão (direita). O processo de impressão é idêntico à impressão convencional por jato de tinta. O cartucho (padrão HP) é o mesmo das impressoras. A máquina executa uma sangria da tinta, limpeza no reservatório do cartucho e adição do binder. Este procedimento faz com que o custo da matéria prima seja reduzido consideradamente.

O ambiente para a prototipagem deverá estar a uma temperatura não inferior a 20° C. É recomendado a instalação

de ar condicionado e aparelho específico para controle de umidade do ambiente.

A máquina de prototipagem possui um termostato para controle da temperatura interna das bandejas, quando a temperatura ambiente por qualquer motivo baixar o próprio sistema da máquina compensa a perda de calor.

Durante o processo de impressão o cabeçote de impressão injeta o binder sobre a camada de pó onde ocorre a reação de enrijecimento. Após a impressão da camada, uma régua mecânica varre o pó em excesso do reservatório até a bandeja de impressão para novamente iniciar o processo de impressão da camada seguinte. Cada passo tem uma espessura de um décimo de milímetro.



Figura 7. Experimento 2. Na foto 6a, o depósito de pó na máquina; Na foto 6b, uma das camadas sendo executada; Na foto 6c e 6d, o cuidadoso trabalho de remoção das peças de dentro do tanque com pó, Na foto 6e e 6f, a aplicação do binder, Na foto 6g e 6h, as peças prontas. Fonte: Autores, 2008.

Dados prototipagem rápida

Modelos Parabolóide Hiperbólica e Treliza – Técnica 3D Printer

- Altura de extrusão (prototipagem) = 44,74 mm
- Modelo da impressora 3D = Z510/CX
- Modelo do pó = ZP130 Z-Bond
- Espessura da camada (layer) = 0,0889 mm
- Número de camadas (layers) = 503

- Tempo de prototipagem = 2 horas e 59 minutos
- Consumo do binder (aglutinante) = 88,3 ml
- Superfície em relação ao volume = 21,86
- Total de partes do volume = 74,11 cm
- Total de área de superfície = 637,64 cm²

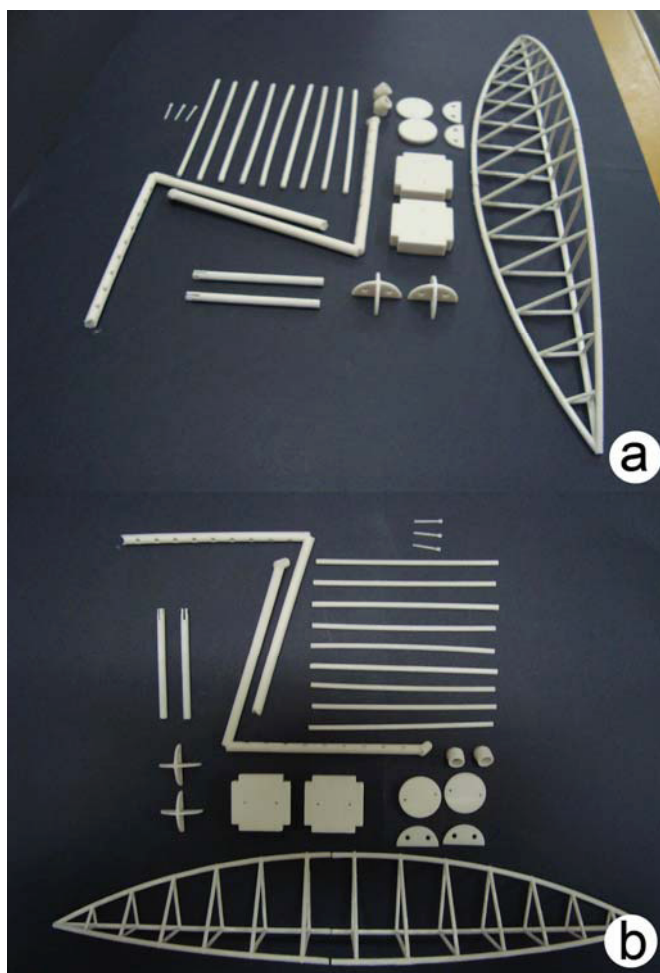


Figura 8. Experimento 2. Os componentes da cobertura parabolóide e a treliza curvilínea. Fonte: Autores, 2008.

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A técnica de fabricação FDM estabelece condições e cuidados necessários que devem ser tomados para evitar problemas tais como fragilidade, distorção, encolhimento do material escolhido [5]. A recomendação é que certos elementos delgados devem ser produzidos por partes, proporcionando maior precisão, rapidez e melhor acabamento.

As maiores restrições se devem tanto a geometria adotada e limitações das máquinas como dos materiais empregados. Mas também há outras: tolerância, contrações, suportes, espessura das partes, posição do modelo para a produção (horizontal / vertical), acabamento, espessura da camada, dimensões do modelo e resistência e fragilidade dos elementos.

Nos dois experimentos realizados a diferença de tempo de execução não foi significativa (3 horas e 26 minutos no 1º experimento e 2 horas e 59 minutos no 2º). Isto se deveu a

alguns cuidados com relação a dois aspectos importantes. Primeiro em relação a separação das peças, o que diminui o consumo de material. Segundo, os autores já sabiam que se fossem seguidos os parâmetros mínimos não ocorreriam dificuldades de execução, portanto sem o problema de retrabalho.

Notou-se que o processo em pó requer considerar uma pequena diferença entre macho e fêmea para encaixes, por causa do excesso de depósito, ocasionando irregularidades na superfície e exigindo a remoção por abrasão. Foram constatadas diferenças de até 1 mm.

Embora o processo em ABS seja mais preciso e apresente um acabamento melhor, o excesso de material de suporte o torna menos atraente do ponto de vista econômico. Além disso, outra vantagem do processo em ABS em relação ao processo em pó é a possibilidade de produzir peças mais finas, em até um milímetro de espessura. Este último aspecto é de especial importância em nossa pesquisa, pois muitos elementos possuem espessuras mínimas.

No processo em ABS nem sempre a máquina lê coerentemente as necessidades estruturais da peça, podendo ocorrer de haver suporte em demasia em áreas de menor distância entre elementos do modelo, bem como a menos em áreas mais distantes (caso das cavernas da treliça, onde, próximo do encontro menor, havia mais suporte do que no resto das cavernas).

Ainda que a tecnologia de prototipagem rápida permita gerar objetos de pequenas dimensões, pois pode-se gerar modelos a partir de camadas de até um vigésimo de milímetro (como na técnica de estereolitografia), na pesquisa realizada notou-se que objetos menores do que 1 milímetro rompem com grande facilidade ou não são executados pela máquina, particularmente quando esses elementos estão “suspensos” da base, “apoiados” apenas pelo material de suporte (como na técnica FDM) ou pelo pó (como na técnica 3D Printer). Quando retirados, são elementos extremamente frágeis, e não resistem quando são tocados para limpeza e montagem.

O processo em pó, por causa da resina acrílica de endurecimento, pode curvar peças longas e mais finas, devido à contração da resina, o que ocasiona perda de precisão durante a montagem dos componentes.

O processo em pó também perde em precisão no caso de furos e encaixes, podendo ocorrer depósito de material a mais do que o projetado e enviado para prototipagem, além do mínimo de espessura ser bem maior que no caso do ABS. Também neste caso, a falta de precisão impede operações delicadas de encaixe e fixação entre componentes.

Uma das maiores desvantagens do processo em ABS em relação ao de pó é a remoção do material de suporte. No modelo de máquina que utilizamos não é possível utilizar material solvente. No processo em ABS, a remoção de suporte é relativamente fácil, por deslocamento, mas no caso de partes muito finas, no limite, pode haver rompimento da peça no ponto de encontro das camadas. Há mesmo situações em que o suporte chega a envolver a peça do modelo! Nesse sentido, a vantagem do processo em pó é que já produz as peças finais, sem necessidade de remoção de suporte.

Para a fabricação de superfícies e elementos curvos em várias direções, o processo em pó é mais vantajoso, pois o

processo em ABS obriga a criação de um suporte que consome muito material para sustentar a peça.

Do ponto de vista de acabamento (não fundamental em casos de estudo de possibilidades arquitetônicas) os dois processos apresentam marcas ou riscas que tornam o produto final poroso ou marcado. Os dois processos podem ser lixados sem grande esforço para adaptações e, se for o caso, receber pintura com tintas plásticas, como as automotivas.

Ao contrário dos modelos físicos tradicionais, onde se podem empregar diversos tipos de materiais, gerando uma aparência heterogênea, PRs expõem a homogeneidade de um único material. Além disso, eles não apresentam o mesmo acabamento satisfatório, às vezes exigindo acabamento manual. O mesmo ocorre com texturas, que são facilmente criados e simulados em modelos digitais e físicos, mas não em protótipos rápidos.

Notou-se que no processo em ABS, no caso de peças produzidas na horizontal, a possibilidade de realizar furos é extremamente grande, podendo ser executados furos de até 0.3 de milímetro aproximadamente. Quando na vertical, o suporte acaba fechando o furo e pode impedir sua abertura na hora da remoção. Já no processo em pó, os furos mínimos parecem ser de 1.7 a 2 mm.

Dentro do contexto de análise projetual, a intenção desses experimentos foi estudar a importância da tangibilidade que é proporcionada pelos protótipos rápidos.

Protótipos rápidos apresentam uma oportunidade para experimentação e descoberta. Além de auxiliar na visualização, podem aprofundar a compreensão dos espaços projetados durante o processo criativo e, sobretudo, na fabricação digital de elementos destinados a construção. Ao materializar objetos virtuais, além da visão atuarão todos os outros sentidos que nos fazem perceber e entender fisicamente o ambiente circundante.

Assim como a pesquisa realizada por Kim e Maher (2008, p.248) [18], que aponta para interação física com objetos como a responsável pela atividade exploratória para ajudar a cognição espacial do designer, foi concluído que a interação direta com o uso das mãos promove a imersão do arquiteto no projeto, permitindo-lhe desempenhar o raciocínio espacial de modo mais eficiente.

Aquilo que Donald Schön denomina “conversa com os materiais” é uma interação exploratória imersiva, na qual o sujeito interage com a representação e re-pensa aquilo que fez. Essa dinâmica de pensar-fazer-pensar com o auxílio dos artefatos é que faz o projeto avançar e ser gradativamente compreendido.

Por fim, 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 dos aspectos que caracterizam suas diferenças e complementaridades.

VI. CONCLUSÕES

A comparação entre diferentes processos de prototipagem rápida é fundamental para orientar futuras ações não apenas com relação à hibridação de técnicas de PR, mas entre artefatos fabricados digitalmente e artefatos utilizados na produção de modelos e maquetes manuais.

O objetivo dos autores é realçar as habilidades no ensino-aprendizagem no processo de projeto em arquitetura a partir da interação entre técnicas tradicionais tais como modelos físicos e desenhos, com modelos digitais 3D e 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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração de Robério Silva de Barros e Everaldo Vitor na operação do equipamento de prototipagem rápida no Laboratório de Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Schön, *Educando o Profissional Reflexivo: um novo design para o ensino e a aprendizagem*. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 2000.
- [2] D. Schön, G. Wiggins, "Kinds of seeing and their functions in designing", *Design Studies*, vol. 13, nº 2, pp.135-156, 1992.
- [3] D. M. Herbert, "Graphic Processes in Architectural Study Drawings", *Journal of Architectural Education*, vol.46, nº1, pp.28-39, 1992.
- [4] W. Florio, M. L. Segall, and N. S. Araújo, "A Contribuição dos Protótipos Rápidos no Processo de Projeto em Arquitetura", in *Anais do GRAPHICA 2007*, Curitiba, 2007.
- [5] J. Giannatsis, V. Dedoussis, and D. Karalekas, "Architectural scale modeling using stereolithography", *Rapid Prototyping Journal*, vol. 8, nº3, pp. 200-207, 2002.
- [6] I. Gibson, T. Kvan, and L. W. Ming, "Rapid prototyping for architectural models", *Rapid Prototyping Journal*, vol. 8, nº 2, pp. 91-99, 2002.
- [7] G. Ryder, et. al., "Rapid design and manufacture tools in architecture", *Automation in Construction*, vol. 11, pp. 279-290, 2002.
- [8] A. Simondetti, "Computer-generated physical modeling in the early stages of the design process", *Automation in construction* 11, pp. 303-311, 2002.
- [9] Y. Wang, and J. P. Duarte, "Automated generation and fabrication of designs", *Automation in Construction* 11, pp. 291-302, 2002.
- [10] J. Breen, R. Nottrot, and M. Stellingwerff, "Tangible virtuality – perceptions of computer-aided and physical modeling", *Automation in Construction* 12, pp.649-653, 2003.
- [11] C. K. Chua, K. F. Leong, and C. S. Lim, *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. Singapore: World Scientific Publishing, 2003.
- [12] J. C. K. Seely, *Digital Fabrication in the Architectural Design Process*. M. S. Thesis, Depto. Architecture Studies, Massachusetts Institute of Technology, MIT, Massachusetts, 2004.
- [13] N.-J. Shih, "RP-aided computer modeling for architectural education", *Computers & Graphics* 30, pp.137-144, 2006.
- [14] M. Burry, "Rapid Prototyping, CAD/CAM and human factors", *Automation in Construction* 11, pp.313-333, 2002.
- [15] M. Stacey, P. Beesley, and V. Hui, *Digital Fabricators*. Waterloo: University of Waterloo School of Architecture Press, 2004.
- [16] B. Khoshnevis, D. Hwang, K.-T. Yao, and Yeh, Z., "Mega-scale fabrication by contour crafting", *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 1, nº. 3, 2005.
- [17] T. Mooden, "CAD/CAMing: The use of rapid prototyping for the conceptualization and fabrication of architecture", *Automation in Construction* 14, pp.215-224, 2005.
- [18] M. J. Kim, M. L. Maher, "The impact of tangible user interfaces on spatial cognition during collaborative design", *Design Studies*, vol. 29, nº3, pp.222-253, 2008.

Wilson Florio – natural de São Paulo, Brasil, Arquiteto formado pela FAU Mackenzie (1986). Doutorado pela FAUUSP (2005). Atualmente é professor de Projeto IX e X na Faculdade de Arquitetura Mackenzie TFG, professor de Informática Aplicada IV: Modelagem e Animação na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP e de Processos Criativos no Instituto de Artes. Líder do Grupo de Pesquisa "Arquitetura, Processo de Projeto e Análise Digital", com pesquisas na área de projeto de arquitetura contemporânea, processo criativo e fabricação digital. Contato: email: wflorio@uol.com.br ou wflorio@iar.unicamp.br; tel. +55 11 36613086.

Nieri Soares de Araújo – natural de São Paulo, Brasil. Arquiteto formado pela FAU Mackenzie (1992). Mestrado pela FAU Mackenzie (2005). Professor da Faculdade de Arquitetura Mackenzie em Computação Gráfica aplicada a disciplina de Projeto. Atualmente pesquisa processos de projeto com auxílio de ferramentas digitais e protótipos rápidos. Contato: email: arq.nieri@gmail.com

Mario Lasar Segall – natural de São Paulo, Brasil. Arquiteto formado pela FAU Braz Cubas (1980). Mestrado no University College London (1983). Dirige atualmente uma empresa de maquetes e leciona na Faculdade de Arquitetura Mackenzie. Interesses em pesquisa que incluem Prototipagem Rápida, Modelagem Física e Processo de Projeto, sempre com viés educacional. Contato: email: mario@sqmaquetes.com.br.