



## A CONTRIBUIÇÃO DOS PROTÓTIPOS RÁPIDOS NO PROCESSO DE PROJETO EM ARQUITETURA

Wilson Florio

Mario Lasar Segall

Nieri Soares de Araújo

UPM - Universidade Mackenzie, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo  
wflorio@uol.com.br, mario@sqmaquetes.com.br, nieri@globo.com

### RESUMO

O processo de projeto depende de sistemas de representação que permitam exteriorizar e explicitar conceitos. Esse processo deve facilitar a troca de informações com eficiência de modo a promover uma comunicação imediata. As maiores dificuldades ocorrem quando os elementos construtivos possuem uma geometria curvilínea complexa. O protótipo rápido (PR), gerado a partir de modelos digitais 3D, tem proporcionado aprofundar a investigação de formas simples e complexas. O objetivo deste artigo é relatar dois experimentos realizados e analisar a contribuição deste recurso de representação para a compreensão e comunicação de informações sobre forma complexa. O artigo conclui que os PR podem assumir um papel decisivo durante as decisões de projeto.

**Palavras-chave: processo de projeto, protótipo rápido, representação.**

### ABSTRACT

The design process depends on representation systems that allow concepts to be made known and explicit. This process must make easy the efficient exchange of information as to promote an expedite communication. The main difficulties occur when the constructive elements contain a curvilinear complex geometry. Rapid prototyping RP obtained from 3D digital models has made it possible to deepen the investigation on both simple and complex shapes. The aim of this article is to relate two experiments and analyze the contribution of this resource of representation for the understanding and communication of information on complex form. This paper concludes that RP can assume a decisive role during design decisions.

**Keywords: design process, rapid prototyping, representation.**

## 1 Introdução

Projetar é antecipar a construção das formas no mundo material. A fim de que o projeto seja pensado, e sua base intelectual seja transmitida para todos os participantes do processo, é necessário representar as idéias bi e tridimensionalmente. Conseqüentemente, o arquiteto deve materializar suas idéias em representações para desencadear as conseqüências das várias possibilidades e implicações que surgem durante o processo de projeto.

O processo de projeto em arquitetura é incerto e imprevisível, onde o arquiteto deve experimentar e testar hipóteses de modo a converter situações indeterminadas em determinadas [8]. As descobertas emergem durante o processo de criação, onde o profissional deve ser capaz de refletir sobre os vários domínios pertinentes à sua atividade, diagnosticando os múltiplos aspectos do problema e propondo possíveis soluções para cada um deles.

Durante a experimentação o profissional confirma ou rejeita cada uma das hipóteses levantadas. Esta tarefa envolve uma série de desenhos e modelos, ambos, digital e analógico, que permitem ao arquiteto fazer o que Donald Schön denominou “reflexão-na-ação” [13]. Neste contexto, são produzidos artefatos para representar e testar idéias através do pensar e do fazer, que ocorre simultaneamente.

Nos últimos anos, a profissão de arquiteto tem sido transformada em um híbrido de processos analógico e digital, onde as habilidades e conhecimentos sobre artefatos produzidos manualmente, e aqueles produzidos computacionalmente, têm sido mesclados. Mas já no início dos anos 90 os arquitetos lentamente começaram a usar modelos digitais para desenvolver seus projetos. O aprimoramento dos programas gráficos permitiu que estudantes e profissionais substituíssem a modelagem física por técnicas digitais. Além disso, percebeu-se uma sensível diminuição de desenhos manuais e um aumento substancial de desenhos auxiliados por computador. A conseqüência disso é que a falta de compreensão das funções comunicativas de cada um desses meios de representação e expressão tem levado a graves equívocos metodológicos, tanto no ensino acadêmico como na prática profissional.

As atividades didáticas que desenvolvemos na graduação e pós-graduação nos últimos 3 anos, tanto no ensino de maquetes físicas como de modelos digitais, têm contribuído para a reflexão crítica sobre o que iremos discorrer ao longo deste texto. No último ano incorporamos à discussão os protótipos rápidos, que são obtidos a partir de modelos digitais tridimensionais.

As experimentações que realizamos tiveram como objetivo principal analisar a possível (re)conciliação entre o uso de desenhos manuais e modelos físicos com modelos digitais e protótipos rápidos. Enfatizamos as diferenças e contribuições desses meios de expressão e simulação atualmente em uso nas atividades projetuais em arquitetura. Além disso, alertamos sobre os riscos da mera substituição de um meio por outro, ou de simplesmente abandonar velhos hábitos sem o devido conhecimento da sua importância durante o processo de projeto.

Neste artigo relatamos algumas dessas experiências e analisamos o papel dos protótipos rápidos no processo de projeto. A intenção é despertar o interesse sobre a discussão a respeito dos meios de representação, 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. 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 e engenharia.

## **2 O Processo de Projeto**

Durante a atividade profissional, os arquitetos acumulam conhecimentos e experiências que estão enraizados em suas memórias – representações internas, e que se manifestam nas ações cognitivas durante a ação projetual – representações externas, tais como desenhos manuais, modelos físicos e digitais. Estas representações permitem materializar suas idéias e melhorar o seu desempenho, facilitando a comparação e avaliação de diferentes idéias. Assim, as representações assumem o papel *ativo* no processo de projeto, pois colaboram para tornar explícito aquilo que está implicitamente na mente de quem está projetando.

Experimentar, de acordo com Schön, é atuar a fim de ver o que resulta da ação. As teorias só podem ser apreendidas por meio de aplicações práticas, e só adquirem significado quando incorporadas durante a experimentação. Entretanto, muitas das ações desenvolvidas na prática não podem ser claramente anunciadas e explicadas racionalmente. Michael Polanyi notou que “nós sabemos mais do que podemos narrar” [11]. É o conhecimento tácito, fundamental para qualquer experimentação nas diversas áreas que envolvem atividades projetuais.

Muitos processos que realizamos são automáticos, isto é, seqüências de ações que são realizadas sem a necessidade de atenção direta para a ação em si. Interrupções desnecessárias de tais fluxos sutis de processos cognitivos devem ser evitadas. A importância dos croquis, que são rapidamente feitos para evitar a interrupção do pensamento e causar perda de certa fluência de idéias, é um procedimento fundamental na fase de criação de projetos. Dessa maneira os croquis ajudam a lançar, visualizar, perceber e manipular idéias graficamente. É por isso que arquitetos normalmente preferem levantar hipóteses primeiramente por meio de croquis, e só mais tarde testá-las em modelos físicos ou digitais.

Entretanto, superfícies irregulares ou curvas mal podem ser experimentadas e representadas sinteticamente em esboços de maneira similar às formas simples regulares. Formas de geometria curvilínea complexa demandam o uso de programas gráficos para auxiliar na definição e representação de suas configurações [5]. Isso se deve ao caráter bidimensional do suporte físico que cria ambigüidades para a interpretação de informação espacial de superfícies curvas [1]. Neste caso, as informações e descrições matemáticas precisas das formas contidas no modelo digital podem ser manipuladas topologicamente em “*n*” direções. As várias vistas oferecidas pelos programas gráficos facilitam a visualização e análise de muitos aspectos dos elementos complexos dispostos no espaço.

Os critérios que adotamos para avaliar os diferentes meios de representação são função comunicativa, inteligibilidade, qualidades táteis, robustez, tempo de produção e custo. Como nenhum meio de representação consegue abarcar todos esses critérios igualmente, há uma dependência no uso integrado de todos eles, explorando o que cada um tem a oferecer.

Muito tem sido escrito sobre o papel dos esboços e desenhos no processo de projeto em arquitetura [5], [8], [9], [10] e [13]. Alguns autores têm escrito sobre o papel dos modelos físicos [2], [4], [10] e [15]. Entretanto, há somente poucos relatos sobre o uso de protótipos rápidos em arquitetura [2], [6], [7], [12], [14] e [16], e praticamente não há relatos sobre as diferenças entre os vários meios de representação e de simulação de espaços [5]. A seguir vamos destacar alguns aspectos que possam contribuir para compreender os aspectos de complementaridade existentes entre os recursos manuais e digitais, sobretudo, como reconciliar o meio analógico e o digital, apontando diferenças e contribuições específicas de cada um deles.

### 3 Modelos Físicos

Os espaços tridimensionais de um edifício somente podem ser dinâmica e completamente percebidos corporalmente se percorridos cinesteticamente. Modelos físicos, como reduções diagramáticas desses espaços, são realizados na tentativa de antecipar sua visualização e tornar sua compreensão mais palpável.

A habilidade profissional de modelar um artefato, em dimensões reduzidas, é essencial, e requer cuidados especiais. 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 representado.

Desenhos são imprescindíveis para comunicar diferentes aspectos do projeto. Projeções ortogonais (plantas, cortes e elevações), axonométricas e perspectivas cônicas comunicam desde aspectos técnicos, estéticos e construtivos até a percepção espacial daquilo que está sendo planejado. Mas os modelos físicos possuem um aspecto que os diferenciam dos desenhos: são insubstituíveis para a *tangibilidade* das idéias.

Aparentemente, a grande diferença entre desenhos e modelos físicos parece ser que enquanto desenhos são feitos sobre um suporte bidimensional, imitando nosso modo de ver em perspectivas cônicas, ou abstraindo em projeções ortogonais, modelos físicos representam o espaço *no* espaço, tridimensionalmente, podem ser tocados pelo tato e sentidos corporeamente, sem a ilusão e abstração de técnicas codificadas de desenho.

Modelos físicos podem ser desmontados para revelar seu interior e seus componentes, tornando mais fácil a compreensão de formas, espaços e sistemas técnicos construtivos. Esses artefatos podem ser colocados dentro de túneis de vento para checar ventilação, esforços de vento, posição de aberturas etc. Eles são fundamentais no processo de ensino e aprendizagem, pois permitem o desenvolvimento do raciocínio espacial e o entendimento de geometrias espaciais intrincadas. Contudo, apesar de ajudarem o arquiteto (ou estudante) a entender as implicações de seus desenhos bidimensionais na construção dos elementos construtivos no espaço, devido à redução de escala, podem omitir certos detalhes e materiais.

Enquanto desenhos bidimensionais tendem a ser muito abstratos e codificados, modelos físicos podem transmitir as idéias principais do projeto mais facilmente, particularmente para clientes sem compreensão de desenhos técnicos. Entretanto, os modelos físicos não podem ser reduzidos a explanações triviais da idéia, pois estão inseridos dentro do próprio processo

criativo, de onde emerge o conceito arquitetônico. Portanto, um dos aspectos mais significativos do modelo físico é seu caráter instrumental para a reflexão, não apenas sobre a criação em si, mas também para desencadear ações cognitivas, experimentações, que possam contribuir para o desenvolvimento de habilidades, competências e pensamento crítico.

#### **4 Modelos Digitais**

Modelos digitais tornam possível testar uma série de aspectos e características do espaço projetado, antecipando a realidade construída. Junto com os modelos físicos, modelos digitais tornam mais fáceis experimentar e simular texturas e cores, assim como a simular diversos tipos de iluminação direta e indireta [5]. Além disso, modelos 3D são desenhados em escala e não dependem das habilidades manuais do profissional que os executa, mas de seu conhecimento de técnicas de modelagem digital.

Embora os programas gráficos ofereçam múltiplas possibilidades de visualização das relações espaciais entre os elementos construtivos do edifício, isso não é suficiente para o total e completo entendimento do espaço que está sendo concebido. Mesmo oferecendo uma melhor compreensão do espaço, a bidimensionalidade da tela do computador impede que certos mecanismos da visão [1] atuem diretamente sobre o modelo digital que “simula” o 3D.

Protótipos virtuais são normalmente usados para visualizar, mas também para analisar aspectos técnicos, tais como esforços estruturais, correntes de ar, carga térmica, etc. Todavia, a maior vantagem dos protótipos virtuais é a possibilidade de simular um “passeio virtual através” do edifício, de tal maneira que seja possível perceber dinamicamente as características e propriedades formais e espaciais do edifício que está sendo concebido.

#### **5 Protótipos Rápidos**

A representação física de um modelo digital é fundamental para a correta avaliação do projeto de arquitetura, pois permite materializá-la. Protótipos rápidos (PRs) podem cumprir esse papel, traduzindo arquivos CAD 3D em modelos físicos. PRs pertencem à terceira fase na evolução das técnicas de prototipagem, onde a primeira foi a manual e a segunda a prototipagem virtual. Só recentemente, após a introdução dos protótipos rápidos no processo de projeto que o papel dos modelos físicos têm sido reavaliados. A seguir vamos destacar algumas diferenças e contribuições deste novo recurso no processo de projeto.

Há dois principais grupos de processos de prototipagem: o aditivo, em que são adicionadas camadas de matéria, normalmente resinas, e o subtrativo, no qual o modelo é esculpido a partir de remoção de material por meio de ferramentas em máquinas por controle numérico (CNC). Assim, PRs são convenientes para a fabricação tanto de elementos regulares como complexos, sobretudo na fabricação de formas irregulares, de difícil confecção manual.

Embora eles normalmente tenham uma função puramente representativa, limitando-se a aparências formais, 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. De acordo com Kai (2003), 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).

De fato PRs em arquitetura servem tanto para a testar, compreender, sintetizar e avaliar a proposta arquitetônica, em seus múltiplos aspectos, como para comunicar facilmente as intenções projetuais para terceiros.

O mesmo modelo digital pode produzir protótipos rápidos em diferentes escalas. Entretanto, devido a restrições de tamanho das máquinas de prototipagem, PRs maiores necessitam ser produzidos em partes, com preços nem sempre compatíveis ou competitivos com modelos físicos. É também importante observar que enquanto em desenho industrial eles são normalmente produzidos em escala natural 1:1, em arquitetura eles são sempre produzidos em escala reduzida (1:200 ou menor). Apesar disso, eles oferecem aos projetistas um senso de julgamento de tamanhos, proporções e relações espaciais.

Em desenho industrial PRs permitem checar a ergonomia do produto através do sentido tátil. Entretanto, em arquitetura e engenharia, somente *mockups* de partes de edificações em escala natural permitem a avaliação dos materiais e sistemas construtivos. Além disso, protótipos rápidos e digitais não tornam possível o senso de espaço em sua real magnitude.

Modelos físicos e protótipos rápidos ajudam estudantes e profissionais a experimentar visual e tatilmente o espaço real reduzido, reconhecer elementos e suas características, inter-relações e seqüências espaciais. O contato físico através do tato permite sentir, analisar e julgar aspectos que a visão, à distância, não permite. Como consequência, o senso de orientação espacial se torna mais fácil porque é possível manipular na realidade aquilo que o conhecimento à distância não oferece.

A possibilidade de rapidamente girar modelos físicos manuais e protótipos rápidos torna mais fácil e imediata a compreensão das formas e espaços. A tangibilidade do protótipo rápido é a maior vantagem em relação ao protótipo virtual [2], cujas imagens na tela do computador podem enganar os sentidos e provocar erros de avaliação. Assim, o protótipo rápido reúne algumas características dos modelos físicos analógicos e dos virtuais.

Desde que os preços dos equipamentos de prototipagem rápida e suprimentos começaram a cair, grandes escritórios de arquitetura, centros de pesquisa e instituições de ensino têm adquirido máquinas novas e avançadas. Como veremos a seguir, a pesquisa realizada pelos autores só foi possível devido a esse processo.

## **6 Experimentação**

Um dos fatores que impulsionou o uso de modelos físicos e digitais em arquitetura nos últimos anos foi a necessidade de resolver problemas relativos a crescente complexidade das formas arquitetônicas. A facilidade de criar superfícies complexas nos principais programas gráficos tem encorajado a produção de formas orgânicas [5]. Mas a necessidade de viabilizar a

construção dessas formas provocou um renovado interesse pelas superfícies regradas.

Inspirados pela pesquisa de Simondetti (2002) e Wang (2002), que apontam para os protótipos rápidos como o meio mais adequado para representar formas de geometria complexa em arquitetura e desenho industrial, os autores conduziram experimentos para investigar projetos de grandes coberturas, aplicando superfícies regradas tais como parabolóides, hiperbolóides e parabolóides hiperbólicos. Utilizamos o processo de prototipagem aditivo, com a máquina FDM, *Fused Deposition Modeling*, da Stratasys, para realizar os dois experimentos e obter os modelos reais tridimensionais.

Testamos os PRs porque identificamos três dificuldades para operar formas complexas com o meio analógico: 1. Formas não ortogonais desorientam o projetista; 2. O projetista pode enfrentar dificuldades de entendimento e avaliação das formas não ortogonais a partir de desenhos 2D, tanto na tela do computador como no papel; 3. A construção manual de modelos físicos de formas complexas pode ser muito difícil, especialmente quando as formas se interseccionam no espaço e em diversas direções.

## 6.1 Experimento 1

O primeiro experimento foi modelado no programa Rhinoceros 3.0, que propiciou a geração de superfícies complexas a partir da definição de algumas curvas. Após a criação do modelo digital tridimensional, exportamos o arquivo com extensão .3DM do Rhino para o formato .STL, estereolitografia. No programa Catalyst este modelo foi dividido em camadas de 0.254 mm. Em seguida as informações e configurações foram enviadas para a máquina de prototipagem que construiu o protótipo, camada por camada.

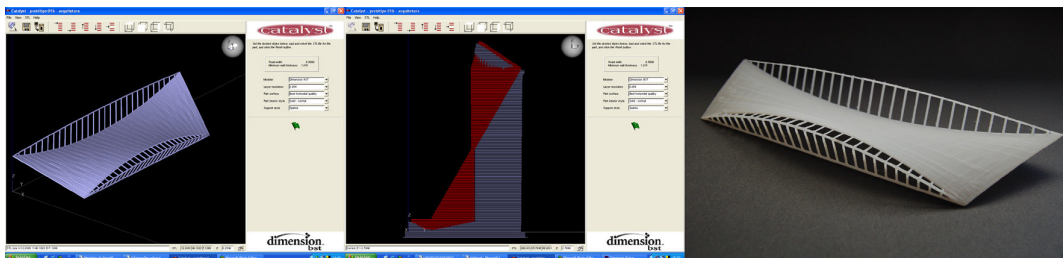


Figura 1: Experimento 1 – a) modelo stl; b) suporte (azul) x resina(vermelho);c) protótipo rápido.

Com 207,26 de largura por 39,08 mm de altura, o tempo de execução deste experimento foi de 4 h e 5 minutos. O modelo consumiu 10,82 cm<sup>3</sup> de resina e 22,40 cm<sup>3</sup> de suporte. Como o processo de execução se dá pelas sobreposições sucessivas de camadas de resina ABS, o programa verifica se há elementos que ficarão suspensos em relação a base e cria um suporte. O resultado indesejável é que no caso de superfícies curvilíneas há maior consumo de material de suporte (Figura 1b, em azul) do que de resina (em vermelho) para a confecção do protótipo.

A indústria aceitou o formato STL como padrão [3], porque a maioria dos sistemas CAD o incluiu nos tipos de arquivos para exportação. Devido ao fato desse formato converter o modelo digital em uma teia de polígonos planos triangulares, as superfícies curvilíneas são resultantes de aproximações, cuja suavidade dependerá do número de polígonos que constituem a superfície. Esta foi uma das grandes dificuldades nos experimentos realizados, porque quanto

maior o número de faces maior o tempo de pré-processamento e de fabricação do protótipo.

Mas identificamos outras limitações no processo de prototipagem FDM. Observamos que elementos delicados e curvos pequenos se tornam difíceis para a máquina produzir com precisão. Para contornar o problema esses elementos devem ser exagerados a fim de tornar viável sua execução, resultando em algo bastante distinto da idéia original. As restrições técnicas forçam o projetista a desenhar para a máquina. A conclusão é que desenhos e modelos podem impor “sua própria gramática sobre o pensamento do designer” [10], atuando direta e ativamente nas suas ações cognitivas durante a resolução de problemas projetuais.

## 6.2 Experimento 2

Neste experimento dividimos a modelagem em componentes, de modo a permitir a fabricação por partes. As articulações esféricas possuem 7mm de diâmetro e os arcos em torno de 180 mm de comprimento cada. O tempo de fabricação de todos os componentes somados foi de 5 horas e 5 minutos. Isso foi conveniente por três motivos: 1. Devido as peças possuírem conformações curvilíneas, demandaria grande quantidade de material de suporte para suspender a confecção das mesmas durante a sobreposição das camadas antes da secagem e enrijecimento; 2. Como alguns elementos são delgados e a execução é realizada pelo depósito de camadas finas na direção vertical, há uma dificuldade de fabricar elementos delicados, pois se cria uma instabilidade estrutural, provocando deformações e imperfeições nas peças; 3. O acabamento final das peças depende da escolha de acabamento horizontal ou vertical. A escolha desse parâmetro define sua aparência, que pode parecer mais lisa ou com aparentes “denteados”. Assim, evitamos os problemas ocorridos no 1º experimento e aprimoramos o processo, obtendo melhor acabamento das peças, com menos deformações.

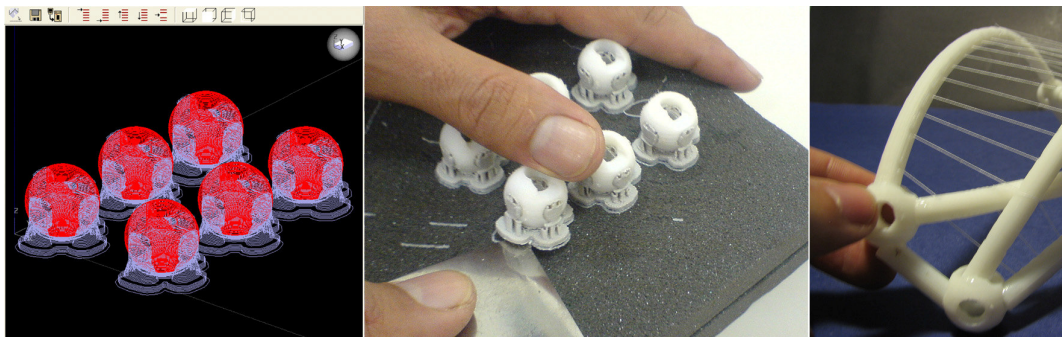


Figura 3: Experimento 2 – a) modelo stl da articulação na tela do Catalyst; b) protótipo rápido sobre a base com o suporte; c) montagem dos elementos produzidos.

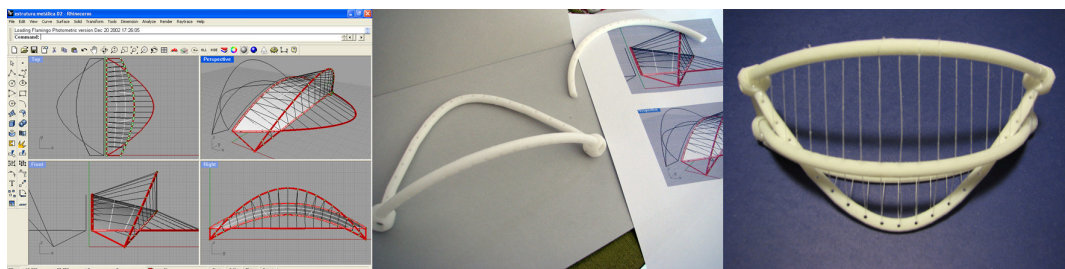


Figura 4: Experimento 2 – a) modelo 3D no Rhino; b) montagem; c) protótipo com os cabos.



Portanto, há 4 parâmetros fundamentais a serem configurados antes da fabricação das peças no programa Catalyst em máquinas FDM: 1. é necessário definir a 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).

Os dois experimentos que realizamos confirmam o estudo detalhado realizado por Ryder (2002), onde o custo dos protótipos rápidos depende da técnica de fabricação, das suas dimensões, do consumo de material, da complexidade formal e do tempo de execução.

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 [6]. 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.

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.

Todos os sistemas de representação possuem limitações, aspectos positivos e negativos. Entendemos que a somatória desses recursos, aplicados em conjunto, pode colaborar para superar as deficiências de cada um deles. Por isso a importância e urgência de entender o propósito de cada meio de representação e simulação, seja manual ou digital. A facilitação da comunicação de idéias contribui para que os membros de diversas equipes de projetistas e de construtores possam gastar menos tempo com a interpretação de desenhos e projetos.

## **7 Conclusões Finais**

Os diferentes meios de representação contribuem de modos distintos para o entendimento e solução do projeto que está sendo realizado. Portanto, eles são complementares e não excludentes entre si. Se modelos físicos e digitais comunicam diferentes intenções projetuais, devem ser utilizados para desencadear diferentes ações cognitivas em cada fase no processo de projeto. Assim, a simples substituição de um meio de expressão por outro reduz as possibilidades de experimentação inerentes no processo de projeto, causando uma perda significativa do processo de aprendizado.

Apesar de limitações em sua fabricação, os PRs contribuem para melhorar substancialmente a comunicação do projeto elaborado. O modelo físico mantém sua importância como meio de experimentação em projeto e não pode ser meramente substituído por modelos digitais. Além disso, modelos físicos ou protótipos rápidos facilitam a apreciação

da proposta espacial, pois nossos aparatos de visão e tátil atuam no espaço tridimensional.

Protótipos rápidos podem contribuir para recuperar o interesse dos jovens estudantes pelos modelos físicos, contribuindo para o entendimento de certos aspectos do projeto que somente podem ser propriamente visualizados e incorporados quando testados e percebidos em três dimensões, como em nosso meio ambiente circundante.

## Agradecimentos

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

## Referências

- [1] ALONSO, Carlos. E. **Percepção tridimensional Desenho bidimensional**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 1994.2v.
- [2] BREEN, Jack. et. al. Tangible virtuality – perceptions of computer-aided and physical modeling. **Automation in Construction**, pp. 649-653, v.12, 2003.
- [3] KAI, Chua C. et al. **Rapid Prototyping: Principles and Applications**. Singapore: World Scientific Publishing, 2003.
- [4] DOLLENS, Dennis. **D•2•A Digital to Analog**. Santa Fé: SITE Books, 2001.
- [5] FLORIO, Wilson. **O Uso de Ferramentas de Modelagem Vetorial na Concepção de uma Arquitetura de Formas Complexas**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005. 477p.
- [6] GIANNATIS, J. et. al. Architectural scale modeling using stereolithography. **Rapid Prototyping Journal**, pp. 200-207, v. 8, nº 3, 2002.
- [7] GIBSON, Ian. et. al. Rapid prototyping for architectural models. **Rapid Prototyping Journal**, pp. 91-99, v. 8, nº 2, 2002.
- [8] GOEL, Vinod. **Sketches of Thought**. Massachusetts: Bradford Book-The MIT Press, 1995.
- [9] GOLDSCHMIDT, Gabriela. On visual design thinking: the vis kids of architecture. **Design Studies**, pp. 158-174, v. 15, nº 2, April 1994.
- [10] LAWSON, Bryan. **How Designers Think**. London: The Architectural Press, 1983.
- [11] POLANYI, Michael. **The Tacit Dimension**. Gloucester: Peter Smith, 1983.
- [12] RYDER, Gerald. et al. Rapid design and manufacture tools in architecture. **Automation in Construction**, pp. 279-290, v. 11, 2002.
- [13] SCHÖN, Donald. **Educando o Profissional Reflexivo: um novo design para o ensino e a aprendizagem**. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 2000.
- [14] SEELY, Jennifer. C. K. **Digital Fabrication in the Architectural Design Process**. Master Science – Architecture Studies, Massachusetts Institute of Technology, MIT, 2004. 77p.
- [15] SIMONDETTI, Alvise. Computer-generated physical modeling in the early stages of the design process. **Automation in construction**, pp. 303-311, v. 11, 2002.
- [16] WANG Yufei e DUARTE, José P. Automated generation and fabrication of designs. **Automation in Construction**, pp. 291-302, v. 11, 2002.