

Flexible multi-scalar system: 3D printing of modular components for adaptable tensioned structures

Rodrigo Scheeren

Universidade de São Paulo | Brasil | rodrigosscheeren@gmail.com

David M. Sperling

Universidade de São Paulo | Brasil | sperling@sc.usp.br

Abstract

In face of the improvement of additive manufacturing techniques for architecture and construction, the paper presents a design experiment that aims to demonstrate the feasibility of using an accessible technology such as a 3D desktop printer for the creation of low-cost artifacts. Based on the "research by design" method and "multi-scalar modeling" approach, it shows the creation of a digitally manufactured architectural component that can integrate as a final product a lightweight and flexible construction system. The result can be geometrically adapted and applied to canopies or facades, achieving an interface between high and low technologies.

Keywords: Digital fabrication; 3d printing; Architectural design; Multi-scalar system; High-Low tech.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de pesquisas e o aprimoramento técnico da manufatura aditiva para a arquitetura e a construção estão se direcionando, em grande medida, para a utilização de novos materiais compósitos e a sua aplicação na fabricação de elementos na escala da edificação. Soma-se a esse cenário o potencial de automação dos processos por máquinas CNC e sistemas robóticos, e a liberdade de criação de projetos complexos proporcionada pelas tecnologias avançadas de impressão 3D. Nesse sentido, o emprego da manufatura aditiva facilita a tradução do modelo digital para formas concretas pelo próprio arquiteto, incluindo a realização de protótipos e a possibilidade da geração de um produto final.

Em contextos nos quais o estágio de implementação de certas tecnologias de fabricação digital ainda não se encontra em um nível avançado, como no caso da América do Sul (Sperling, et al., 2015), a manufatura de elementos vem sendo determinada por processos de transferência e apropriação tecnológica (Bonsiepe, 1983). Assim, nos deparamos com a limitação da escala de execução dos artefatos pelas impressoras FDM disponíveis, sejam importadas ou montadas em nossa região, além da escassez da criação local de maquinário direcionado para a área da construção. Como alternativa a essa condição, são necessárias estratégias para superar a limitação dimensional e de materiais passíveis de serem utilizados com as tecnologias à disposição, estabelecendo dinâmicas construtivas híbridas entre a composição analógica e a fabricação digital.

Partindo dessa conjuntura, o artigo apresenta um experimento projetual que pretende demonstrar a viabilidade de se articular o uso de uma tecnologia acessível, como as impressoras 3D de mesa, para a

criação de artefatos de baixo custo que possam compor distintas configurações como elementos arquitetônicos. O objetivo do trabalho é criar um componente, utilizando a impressão 3D, empregado em um sistema estrutural e de vedação. Conjuntamente a materiais industrializados, este componente permite configurar sistemas flexíveis de módulos hexagonais na função de segunda pele ou cobertura leve em edificações. Essa proposição representa o controle pelo arquiteto desde o design até a realização de um produto final que possa ser utilizado em situações reais.

A impressão 3D compreende uma ampla variedade de tecnologias, inicialmente aplicada em outros setores da produção industrial – da engenharia mecânica até a aeroespacial –, e que têm evoluído significativamente nos últimos anos, da prototipagem rápida para a manufatura direta e a fabricação pessoal (Bogue, 2013). Entre os exemplos mais conhecidos estão a estereolitografia (SLA), a sinterização seletiva a laser (SLS), o processamento digital de luz (DLP) e a fabricação por depósito de material ou por filamento fundido (FDM ou FFF). Com isso, a transferência tecnológica para o design, a arquitetura e a construção passa a ocorrer na medida em que são descobertas novas funcionalidades e modos de aplicação em cada campo de estudo.

A escolha pela manufatura aditiva é considerada atrativa devido ao impacto que pode promover na escala de produção e de distribuição, diante de uma série de vantagens em termos de personalização e desafios para o desenvolvimento de tecnologias robustas e acessíveis. Os seus potenciais benefícios em termos de sustentabilidade incluem menor desperdício durante a fabricação, a capacidade de otimizar geometrias e criar componentes leves que reduzem o consumo de material e de energia,



além da produção localizada (Ford & Despeisse, 2016). Essas características são a base do interesse amplo e de investigações *sui generis* que tentam incorporar expertises de outros setores produtivos para o setor da arquitetura, engenharia e construção (AEC).

A publicação de artigos relacionados à aplicação da impressão 3D na indústria da construção cresceu de maneira acelerada na última década, nos quais os interesses de pesquisa estão concentrados na análise de técnicas de impressão, no exame dos materiais possíveis de serem utilizados e em projetos arquitetônicos voltados ao uso dessa tecnologia (Tay, et al., 2017). Isso representa a fase experimental na qual nos encontramos, em que boa parte das investigações intenta desenvolver novos métodos de aplicação das tecnologias, e outra parte foca no aprimoramento dos resultados. Com o conhecimento adquirido e a ampliação da diversidade de proposições, é fundamental o desenvolvimento de projetos e elementos construtivos que aperfeiçoem aspectos qualitativos, reconheçam e proponham fatores de inovação.

A impressão 3D abre possibilidade para a customização em massa, a fim de desdobrar sistemas já existentes em novos conjuntos que podem ser personalizados, sem aumento de seus custos. Como resultado, há uma mudança de paradigma que se descola da arquitetura tradicional, em que um componente agora é capaz de servir a várias funções, em vez da necessidade de vários componentes heterogêneos, cada um respondendo a uma função específica (Paoletti, 2017). Esse potencial é colocado em prática através de proposições e experimentações cumulativas, que exigem o controle do material, da modelagem, da fabricação, de testes e análises.

A proposição do artigo é a de descrever o processo de concepção e fabricação do componente referido acima, além da composição de seu sistema, pretendendo contribuir com futuras investigações empenhadas em compreender e assimilar as tecnologias de manufatura aditiva mais acessíveis. Desse modo, pretende fomentar iniciativas para a superação das limitações de escala de fabricação das impressoras 3D, com estratégias criativas de processos projetuais que avancem do estágio dos modelos e protótipos para o dos produtos finais.

METODOLOGIA

O método utilizado no desenvolvimento do “sistema flexível multiescalar” foi o design orientado à prática, também denominado na bibliografia como “*research by design*”. Conforme Hauberg (2011, p. 52), esta é uma prática em que a pesquisa parte da proposição de um modelo ou de um experimento, para então seguir por um processo de racionalização e análise, em direção a teorias e generalizações. Desse modo, tem a finalidade de reconhecer a prática de projeto e a produção de artefatos como meio de obtenção de novos conhecimentos, “*extraindo conscientemente regras sobre o objeto do processo de pesquisa*” (Hauberg, 2011, p. 52).

A proposta de investigação acima mencionada envolve experimentos práticos em laboratório, que se desdobram em relatos das etapas do processo, descrevendo e analisando o que foi alcançado (Hauberg, 2011, p. 51),

criando soluções de design que resultam na produção de objetos, além de introspecções teóricas que podem se tornar úteis a outros pesquisadores. Com efeito, promove conexões entre a academia e a profissão, por meio de uma pesquisa baseada em materialidade que gera “*investigação crítica*”, mediante o trabalho de design que inclui propostas realizadas.

No projeto descrito nesse artigo, essa conduta é alcançada por meio da modelagem algorítmica computacional, impressão 3D com máquina de pequena escala, montagem com alguns elementos industrializados, composição de *mock-up* em escala real e teste do sistema em diversas situações. O domínio do processo criativo acontece por meio a utilização do design computacional e de suas ferramentas de programação, além do controle da materialização por meio do processo de automação via fabricação digital, permite a sistematização técnica que a estratégia requer para a descrição das etapas de maneira mais objetiva.

A abordagem complementar de trabalho assimilou o conceito de “*modelagem multiescala*” como estratégia central para a prática. Essa ideia baseia-se na organização das hierarquias de informação e compreensão dos diferentes níveis de organização material, partindo do nível mais abstrato ao mais detalhado, considerando as dependências existentes entre os diferentes objetos em escalas e resoluções (Poinet et al., 2016). Dessa maneira, desdobrar a aplicação da concepção multiescalar no projeto não se limita a uma noção de representação, mas à tarefa de assimilar o comportamento completo do sistema.

No caso do sistema proposto, a abordagem multiescalar é apropriada como suporte para a criação de componentes com dimensões variadas, que surgem de geometrias simples e constituem interfaces materiais complexas das partes com o todo, determinando elementos de maior escala. Aplicações análogas empregam a abordagem para considerar as diferentes escalas de design, do material, da forma dos componentes individuais e do projeto global, utilizando procedimentos de manufatura aditiva (Naboni et al., 2019). Com efeito, desdobra-se o potencial de controle e resolução do material e da geometria por meio da impressão 3D.

RESULTADOS

Os primeiros conceitos e estudos para a criação do sistema foram desenvolvidos durante estágio de pesquisa no Departamento de Arquitetura, Ambiente Construído e Engenharia da Construção do Politécnico di Milano, em que foram utilizadas impressoras 3D industriais de grande dimensão para a compreensão técnica de suas potencialidades e dos materiais que são capazes de processar. O processo de ideação e elaboração do sistema iniciou pelo interesse acerca de sistemas construtivos baseados na customização de componentes intertravados. Percebendo-se que a relação entre a quantidade de peças e o material necessário para se atingir a escala dos elementos projetados com a impressão 3D demandava uma grande produção, partiu-se para a investigação técnica de conexões e encaixes.

A ideia inicial do projeto se desdobrou na concepção de uma malha estrutural que pudesse ter em sua base uma

geometria modular capaz de ser alterada a fim de se adaptar a diversas funções. Outro ponto considerado foi o de criar um sistema leve por meio de peças que pudessem ser conectadas, abrangendo uma área considerável com menos material. A característica principal desse sistema deveria ser a capacidade de montagem e configuração tanto de uma maneira rígida quanto flexível, a fim de suportar tanto esforços de compressão quanto de tração. Além disso, que pudesse agregar outros elementos na constituição do componente principal.

O sistema resultante possui base geométrica hexagonal (Figura 1), que pode se desdobrar em distintas escalas a partir de uma composição modular. É dessa base abstrata que são extraídas as partes que compõem as distintas hierarquias de informação no modelo. Em seus nós, são gerados os elementos de encaixe e conexão em forma de tripé, que podem ser ligados entre si por peças extensoras ou por cabos. A partir dos nós, conectam-se interfaces customizadas que agregam camadas de complexidade ao conjunto constituído.

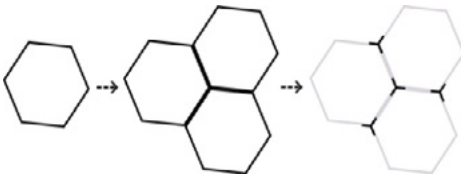


Figura 1: Esquema de definição da geometria base do sistema e os nós de conexão.

Os nós se tornaram o elemento central a ser explorado no processo de modelagem e fabricação do sistema, exercendo o papel de guia da geometria e suporte das interfaces. Para garantir a capacidade de rápida adaptação do modelo, e que uma série de atributos pudessem ser controlados parametricamente, o componente foi gerado no software Rhinoceros 3D com o *plugin* Grasshopper. Esse procedimento facilita não somente a variação dimensional das partes, mas também ajustes e refinamentos na peça, quando necessários para o processo de fabricação (Figura 2).

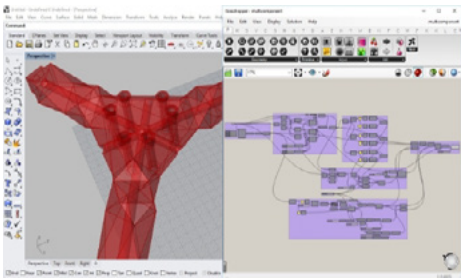


Figura 2: Workflow da definição algorítmica do componente, utilizando Rhinoceros e o *plugin* Grasshopper.

O processo de definição algorítmica (Figura 3) parte das 3 arestas iniciais que compõem o nó, podendo ser alteradas em comprimento e ângulos entre si. Para gerar o corpo do componente, foi utilizado o *plugin* "Exoskeleton", que cria uma topologia baseada em *meshes*, simulando estruturas

tridimensionais esqueléticas naturais, no qual se pode controlar o número de lados, a espessura e os nós. O *workflow* segue para a caracterização dos extensores na ponta de cada uma das arestas, os quais têm a função de encaixe com adaptadores ou prolongamentos. Na sequência, são determinados os tubos internos horizontais e os tubos internos verticais, que conferem espaçamentos necessários para a passagem de elementos de estruturação rígida – barras – ou flexível – cabos. Ao final, a definição converge todas essas informações para um único elemento, permitindo o controle da escala do mesmo.



Figura 3: Diagrama descritivo do *workflow*, com as etapas correspondentes ao fluxo de informações que compõem a definição algorítmica do componente.

O resultado da modelagem associativa, gerada por meio de um processo algorítmico, é generativo na medida em que se obtém um objeto mais complexo do que as informações fornecidas inicialmente e para além das geometrias previamente fornecidas. Assim, o procedimento é facilitado em relação à modelagem direta, já que seria extremamente trabalhoso gerar as triangulações para o corpo do componente. Como é possível ver na Figura 4, a escala de hierarquia das informações na composição do modelo vai se complementando, à medida que são verificadas colisões entre as geometrias internas e externas, e os parâmetros ajustados. Os elementos geométricos negativos, gerados por subtração, e denominados "condutores", têm o intuito de criar aberturas para encaixe ou passagem de elementos complementares.

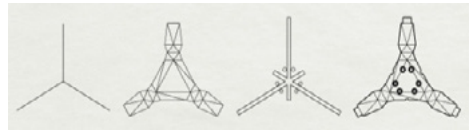


Figura 4: Hierarquia de informações da geometria: 1) curvas iniciais; 2) volume exterior; 3) elementos negativos internos; 4) componente construtivo

O componente, inserido na geometria hexagonal, volta a ser articulado com o sistema, no qual são refinadas a escala da peça em relação ao todo e as suas conexões. Nesse caso, foi estabelecido que o "sistema flexível multiescalar" se configuraria sob tensionamento e, sendo assim, a ligação entre os componentes pode ser feita por cabos, permitindo maior distanciamento entre os nós, além da maior área coberta por esse sistema. Ademais, essa decisão torna o sistema flexível (Figura 5), para que possa ser movimentado em distintos eixos, não se comprometendo apenas em manter a geometria plana. Isso acrescenta outras finalidades ao conjunto, já que a malha geométrica pode ser adaptada de maneira a formar estruturas de dupla curvatura.

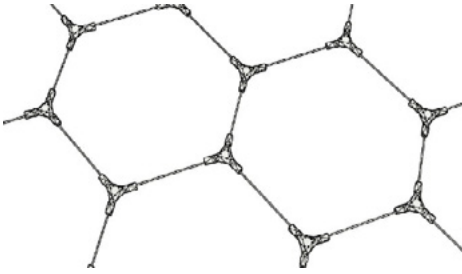


Figura 5: Representação da relação entre os componentes situados no sistema flexível e a formação da malha.

O protótipo digital do componente pode então ser refinado e articulado na sua dimensão material e de fabricação. Nele, os elos das geometrias triangulares entre as hastes e o corpo promovem um reforço mecânico, dificultando seu rompimento. Os ângulos das triangulações foram mantidos com pouca inclinação para facilitar o depósito de camadas no processo de impressão e minimizar o uso de suportes. Na parte do corpo estão situados os condutores verticais, para alocar parafusos que fixam outras peças customizadas, que podem cumprir distintas funções de interface com elementos adicionais ao sistema. No protótipo desenvolvido, essa interface foi composta por uma peça cortada a laser em acrílico 3 mm, que opera como suporte para uma trama de fios de nylon no qual pode ser costurado um tecido para cobertura do hexágono. Os condutores horizontais servem de passagem para os cabos de aço, travados no corpo do componente por grupos de aço.



Figura 6: Representação em perspectiva do componente modelado e seus detalhes constitutivos.

No processo de impressão 3D, foram realizados diversos testes de protótipos para compreender o comportamento do material e as configurações de fatiamento em relação aos resultados esperados. Inicialmente, foi utilizado o filamento plástico de poliláctico (PLA), por ser um material acessível e de fácil manipulação para uma impressora 3D *desktop*, além do que, "para os testes em flexão de três pontos, o PLA possui índices de resistência muito superiores ao ABS" (Martinez, et al., 2019, p. 139). Após alguns experimentos, chegou-se à configuração de impressão de 0,1 mm por camada, dupla linha de parede e preenchimento de 25% com padrão triangular. A

geometria dos condutores internos compõe uma estruturação extra, conferindo maior rigidez ao componente.

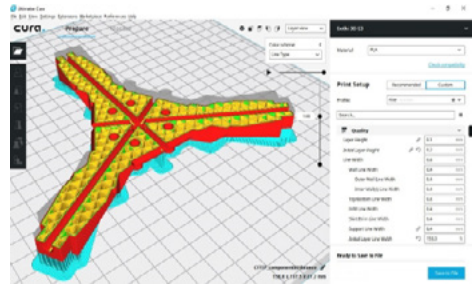


Figura 7: Representação de uma das camadas, geradas pelo fatiamento do modelo para a impressão 3D

Após testes de montagem do sistema e testes de encaixe com os elementos industrializados (Figura 8), o modelo foi ajustado digitalmente e novas impressões foram realizadas, avaliando-se distintas configurações de preenchimento na peça e possíveis falhas nas camadas devido à geometria. Para a impressão 3D da versão final do componente, foi utilizado material plástico PLA com características especiais, resistência mecânica superior e maior durabilidade. Assim, ele é capaz de ser empregado como produto final e suportar distintas condições de exposição ao ambiente externo.

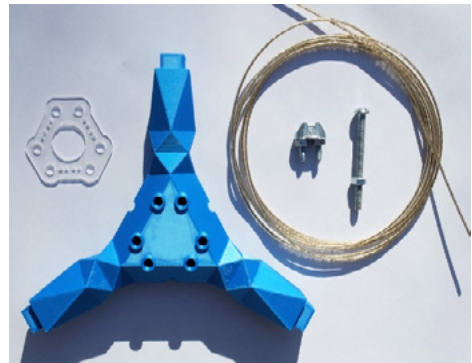


Figura 8: Conjunto de elementos para o sistema: a) peça de acrílico 3 mm; b) protótipo impresso em PLA; c) cabo de aço encapado 4 mm, parafuso com porca e grampo de aço.

Para a fase de teste em situação real, foi montado um módulo com 6 peças no qual o sistema foi tensionado em um plano regular, engastado em um quadro de madeira para suporte do mesmo (Figura 9). Nessa situação, foi possível analisar a eficácia da passagem dos cabos pelos condutores, o travamento de suas pontas no corpo do componente por meio dos grampos e como os componentes garantiram a angulação de cada conexão necessária para a formação do hexágono. Com os módulos situados, torna-se facilitada a etapa de trançar a fiação de nylon nas peças de acrílico como suporte para um tecido leve.

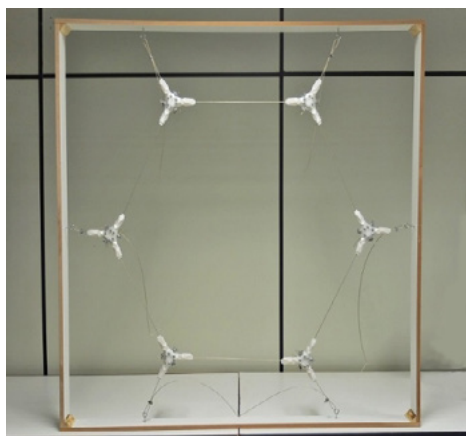


Figura 9: Módulo hexagonal instalado em quadro de madeira de dimensões 2 x 2,2 m.

Os módulos podem ser customizados digitalmente, sem que seja necessária a variação de ângulos para a composição de outras geometrias ou que os vetores de arranjo da malha sejam distintos do plano. O componente tripé, como produto final (Figura 10), apresenta característica de resistência mecânica elevada. A inserção e retirada de parafusos dos condutores verticais não causaram danos nas camadas de impressão. Outra característica positiva é o acoplamento estável da peça de acrílico ao conjunto, criando uma boa interface com elementos adicionais. Ao final, o conjunto é extremamente leve, de fácil montagem e desmontagem.



Figura 10: Detalhes do componente em sua versão final, com os elementos industrializados

O componente apresenta, como resultado, um novo formato de peça de conexão e encaixe. Esse tipo de artefato frequentemente é pensado como um acessório secundário em alguma estrutura espacial, na qual cumpre apenas uma função muito específica, ao tornar-se um ponto de convergência de esforços e encaixe de outras partes com múltiplos vetores. Em nosso caso, ele se desdobra de modo multiforme, no qual podem transpassar diversos tipos de elementos e materiais com seus devidos comportamentos, fornecendo suporte para que outras conexões possam ser criadas – numa espécie de funcionalidade complementar.

DISCUSSÃO

O processo de investigação ocorreu de modo experimental, sem expectativas prévias em relação a qual seria o resultado final ou de que modo poderia solucionar um problema específico. Isso permitiu uma liberdade de especulação e criação do sistema, a fim de imaginar possibilidades práticas emergindo de exercícios formais. Tal fato provoca uma mudança de perspectiva vinculada às dinâmicas que estamos habituados a abordar na arquitetura, desterritorializando o pensamento de projeto: da solução de problemas contingenciais para a prototipagem de sistemas emergentes. Segundo Luck (2019), a expansão do entendimento sobre a pesquisa em design e sua relação com pesquisa em arquitetura implica diferentes maneiras pelas quais a prática e a investigação baseada em práticas desdobra novos debates epistêmicos.

A definição algorítmica de todo o processo de modelagem permite o controle completo do fluxo de informação, no qual é possível alterar os parâmetros estabelecidos, ou incluir outros, de maneira facilitada. Se tal fato exige uma maior dedicação inicial nesta definição, ela se torna uma aliada ao considerarmos que a criação de componentes construtivos customizados exige constantes variações e ajustes que não são meramente formais, mas que estão associados às conexões com outros elementos, ou seja, com a sua funcionalidade e performance. Além desse aspecto, ela é um fator determinante na geração e na readaptação dos modelos para a impressão 3D, já que são necessários testes materiais para a verificação e a validação dos limites desejados para os esforços mecânicos aos quais estão submetidas as peças.

Logo, o processo de investigação funde o digital e o material, numa contínua retroalimentação de informações. A complexidade do modelo, com a sua geometria externa e as geometrias internas, só é possível de ser materializada por meio da manufatura aditiva. O emprego dessa tecnologia permite a automação do processo de fabricação, o que significa deixar a carga da máquina parte do exercício laboral de produção. Por meio da apropriação tecnológica, o que poderia ser denominado apenas como “low-tech” ou “high-low”, conceituamos como “porosidades tecnológicas”, por não se tratar unicamente de uma adaptação técnica aos condicionantes materiais locais, mas também ao fato de se pensar de que modo as tecnologias acessíveis e suas possibilidades produtivas podem ser mescladas com dispositivos e artefatos disponíveis no circuito comercial da construção, de maneira a potencializar seu resultado criativo.

Em pesquisas precedentes, a título de exemplo, foram criados sistemas modulares hexagonais complexos para fachadas cinéticas (Jahanara & Fioravanti, 2017; Globa et al., 2019). As propostas são robustas e empregam um grande número de artefatos e de aparelhos, além de serem organizados utilizando-se um extenso número de peças para cobrir áreas amplas. Essas propostas são ricas em termos de complexidade, mas que, para montagem e aplicação, exigem trabalho técnico especializado, guardados seus objetivos. Existem também referências projetuais utilizando lógicas semelhantes, como o “Arachne”, da Archi-Solution Workshop, na China, o “Pre:vault pavilion”, produzido na Escola de Arquitetura de Aarhus, na Dinamarca, o “Eden Project”, de Grimshaw

arquitetos, no Reino Unido, e o "Lumen" de Jenny Sabin, nos Estados Unidos.

O sistema proposto no artigo se difere das referências listadas acima por aliar a flexibilidade e a multiescalaridade à fabricação digital de componentes de baixo custo, à utilização de materiais adicionais fabricados industrialmente também de baixo custo, à facilidade de montagem e à variabilidade de usos. Desse modo, o estudo indica ser possível a utilização da impressão 3D, a tecnologia de fabricação digital de maior acessibilidade na América do Sul, para a criação de um sistema com alto valor agregado de projeto, a um baixo custo de confecção. O sistema pode ser fornecido em kit de peças, facilmente montado e adaptado em suas dimensões por não especialistas, com aplicações para a proteção de insolação em fachadas ou apoio de coberturas leves. O projeto pode, portanto, tornar-se aberto e acessível, com o restante dos elementos adquiridos em lojas de material de construção, colocando-se em prática a estratégia de "faça-você-mesmo".

CONCLUSÃO

Por meio do design orientado à prática, ou pesquisa pelo design, foi possível demonstrar a capacidade de criação de um componente arquitetônico manufaturado digitalmente que possa integrar um sistema construtivo como produto final. O experimento foi realizado utilizando-se impressoras 3D de baixo custo e com capacidade de produção em dimensões reduzidas. Os resultados só se tornaram possíveis mediante a aplicação da estratégia multiescalar de design e de organização da informação no projeto, além da exploração intuitiva acerca do uso misto de tecnologias avançadas com tecnologias industriais e de manufatura pessoal.

As próximas etapas do estudo preveem a simulação computacional de esforços mecânicos e a realização de testes de durabilidade do sistema em condições normais de uso em espaço externo, quando estará sujeito aos efeitos de insolação e outras intempéries. Em testes prévios, o componente foi exposto à insolação direta por algumas horas, não sendo verificadas deformações. Com a execução desses testes, espera-se compreender não somente o comportamento do material, mas o do sistema como um todo. Outro tópico de desenvolvimento futuro, que pode ser adequado para outros tipos de componentes impressos 3D, é aliar processos de otimização topológica com a programação de efeitos de variação gradiente no preenchimento (CNC Kitchen, 2020), para promover reforços de material onde seja necessário na peça.

A expectativa é a de que a investigação seja utilizada como base para o desenvolvimento de propostas vindouras – aprimoramento técnico dos próprios elementos apresentados ou subsidiando projetos similares –, e que o sistema possa ser utilizado em meios sociotécnicos adequados, como complemento às estruturas arquitetônicas estabelecidas em diferentes contextos de escassez material. Além disso, que possa fomentar a investigação experimental em laboratórios de fabricação digital da aplicação das tecnologias para a criação de componentes direcionados ao uso na

edificação, oferecendo suporte para processos de pré-fabricação ou construção no canteiro.

AGRADECIMENTOS

Processo nº 2017/04946-7 e processo nº 2018/15517-2, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). À professora Dra. Ingrid Paoletti pela supervisão durante o período no ABC Department do Politécnico di Milano.

REFERÊNCIAS

- Bogue, R. (2013). 3D printing: The dawn of a new era in manufacturing? *Assembly Automation*, 33(4), 307–311. <https://doi.org/10.1108/AA-06-2013-055>
- Bonsiepe, G. (1983). *A tecnologia da tecnologia*. São Paulo: Edgard Blücher.
- CNC Kitchen. (2020, jan. 11). *Gradient Infill – NEW efficient infill for 3D* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=hq53gsYREHU>
- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573–1587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>
- Globa, A., Costin, G., Wang, R., Khoo, C. K., & Moloney, J. (2019). Hybrid Environmental-Media Facade – Full-Scale Prototype Panel Fabrication. In *Proceedings of the 37th eCAADe and 23rd SIGraDi Conference – Volume 2*, Porto, Portugal, 685-694.
- Hauberg, J. (2011). Research by Design – a research strategy. *Architecture & Education Journal*, 5, 46–56.
- Jahanara, A., & Fioravanti, A. (2017). Kinetic Shading System as a means for Optimizing Energy Load – A Parametric Approach to Optimize Daylight Performance for an Office Building in Rome. In *Proceedings of the 35th eCAADe Conference – Volume 2*, Rome, Italy, 231-240.
- Luck, R. (2019). Design research, architectural research, architectural design research: An argument on disciplinary and identity. *Design Studies*, 65, 152–166. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2019.11.001>
- Martinez, A. C. P., Souza, D. L. de, Santos, D. M. dos, Pedroti, L. G., Carlo, J. C., & Martins, M. A. D. (2019). Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural. *Gestão & Tecnologia De Projetos*, 14(1), 125-141. <https://doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148289>
- Naboni, R., Brescghello, L., & Kunic, A. (2019). Multi-scale design and fabrication of the Trabeculae Pavilion. *Additive Manufacturing*, 27, 305–317. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.005>
- Paoletti, I. (2017). Mass Customization with Additive Manufacturing: New Perspectives for Multi Performative Building Components in Architecture. *Procedia Engineering*, 180, 1150–1159. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.275>
- Poinet, P., Nicholas, P., Tamke, M., & Thomsen, M. R. (2016). Multi-Scalar Modelling for Free-form Timber Structures. In *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2016 "Spatial Structures in the 21st Century"*. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.09.024>
- Sperling, D., Herrera, P., Celani, G., & Scheeren, R. (2015). Fabricação digital na América do Sul: um mapeamento de linhas de ação a partir da arquitetura e urbanismo. In *Proceedings of 19th Iberoamerican Congress of Digital Graphics*, Florianópolis, 119-125. <https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2015-30212>