

PAVILHÕES EXPERIMENTAIS COMO LABORATÓRIO DE PROJETO E FABRICAÇÃO DIGITAL

RESEARCH PAVILIONS AS A LABORATORY FOR THE DIGITAL DESIGN AND FABRICATION PROCESS

 Felipe Tavares da Silva ¹

 Maria Gabriela Caffarena Celani ²

 Érica de Sousa Checcucci ³

¹ Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil,
felipe.tavares@academico.ufpb.br

² Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, celani@unicamp.br

³ Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil, erica.checcucci@ufba.br

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar e discutir a construção de pequenos pavilhões como oportunidade de experimentação no processo digital de projeto, modelagem, fabricação digital (FD) e montagem de formas complexas arquitetônicas, baseadas em oficinas realizadas entre os anos de 2017 e 2019 em duas faculdades de Arquitetura em diferentes universidades do Brasil. O *Design Science* foi o principal método científico adotado na pesquisa, sendo a pesquisa de campo exploratória experimental utilizada nas diferentes oficinas para produção dos objetos e validação do processo. Os pavilhões consistiram em estruturas de cascas funiculares com função de promover sombra, e suas formas foram obtidas por algoritmo generativo paramétrico. Aos participantes das oficinas de modelagem foi disponibilizado um código do Grasshopper para que eles o manipulassem com fins de projetar suas próprias versões do pavilhão. Foram materializados, entre maquetes em escala reduzida e protótipos em escala natural, quatro diferentes instâncias de pavilhões modeladas e fabricadas digitalmente. Com estas experiências evidenciaram-se diferentes potencialidades didáticas que a modelagem paramétrica (MP), a FD e a montagem de pavilhões podem oferecer. Dentre estas, a reflexão sobre processos de concepção de uma envoltória arquitetônica e as suas implicações na construtibilidade, a experimentação da MP no projeto da forma e a possibilidade de vivenciar todo o ciclo de projeto e construção de um objeto arquitetônico durante o curso de graduação. Apresentando as experiências vivenciadas e discutindo sobre suas vicissitudes e as dificuldades encontradas, este trabalho espera contribuir com a discussão sobre MP e FD de envoltórias arquitetônicas de formas complexas.

Palavras-chave: modelagem paramétrica, fabricação digital, pavilhão experimental.

Contribuição dos autores:

FTS: conceitualização, análise, aquisição de financiamento, investigação, metodologia, administração do projeto, recursos, programas, supervisão, validação, escrita - rascunho original, revisão e edição. **MGCC:** conceitualização, investigação, metodologia, administração do projeto, supervisão, validação, escrita - revisão e edição. **ESC:** aquisição de financiamento, investigação, metodologia, administração do projeto, recursos, supervisão, validação, escrita - revisão e edição.

Fomento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Declaração de conflito: nada foi declarado.

Editor Responsável:

Rafael Urano Frajndlich 

Abstract

The objective of this paper is to present and discuss the construction of small pavilions as an opportunity for experimentation in the digital design, modeling, digital fabrication (DF) and assembly process of complex architectural forms based on a series of workshops held between the years of 2017 and 2019 in two schools of Architecture in different universities in Brazil. Design Science was the primary scientific method adopted in the research, with experimental, exploratory field research being used in different workshops to produce objects and validate the process. The pavilions consisted of funicular shell structures used for shading, and their forms were obtained by a parametric generative algorithm. Participants in the modeling workshops were given a Grasshopper code, which they could alter to design their own versions of the pavilions. Scale models and full-scale prototypes of four different pavilions modeled and manufactured were materialized. With these experiences, different didactic potentialities that the parametric modeling (PM), the DF and the assembly of pavilions can offer were evidenced. Among these the reflection on the design processes of an architectural envelope and its implications for constructability, the experimentation of PM in the design of the form and the possibility of experiencing the entire cycle of design and construction of an architectural object during the undergraduate course. Presenting the lived experiences and discussing their vicissitudes and the difficulties encountered, this work hopes to contribute to the discussion on PM and DF of architectural envelopes in complex shapes.

Keywords: parametric modeling, digital fabrication, research pavilion.

How to cite this article:

SILVA, F. T. da; CELANI, M.G.C.; CHECCUCCI, E. de S. Pavilhões experimentais como laboratório de projeto e fabricação digital. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, p. e023008, 2023. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v14i00.8665024>

Submitted 18.03.2021 – Approved 21.03.2023 – Published 15.05.2023

e023008-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, p. e023008, 2023, ISSN 1980-6809



Introdução

Este artigo traz o registro das produções desenvolvidas em duas atividades que envolveram a modelagem digital, simulação estrutural, fabricação digital e montagem de maquetes e protótipos de pavilhões experimentais. Não serão detalhados todos os processos envolvidos nestas atividades, mas a experiência no que concerne ao processo de projeto do produto para sua materialização.

Esta pesquisa teve por objetivo investigar os processos técnicos de modelagem paramétrica (MP), avaliação estrutural, fabricação digital (FD) e montagem de formas funiculares para uso arquitetônico, não estando no seu escopo avaliar as experiências individuais dos participantes das oficinas realizadas. As formas funiculares em casca são aquelas estruturas em casca que não apresentam a manifestação de momentos fletores em nível relevante quando submetidas às cargas gravitacionais, apresentando melhor desempenho do que as outras formas de superfícies.

As experimentações trazem discussões sobre a integração entre os conceitos relacionados com a Modelagem da Informação da Construção (BIM), a Modelagem Paramétrica (MP), *Computer Aided Design* (CAD), *Design-to-Production*, e a transdisciplinaridade entre eles. Mais especificamente, foram também investigados aspectos sobre a geração da forma desde o *form-finding* à subdivisão da superfície, a viabilidade estrutural, o sistema de conexões e o sistema de codificação para montagem.

Oficinas foram realizadas usando um modelo algorítmico, generativo e paramétrico desenvolvido e implementado no Grasshopper (GH), tendo este a capacidade de gerar a forma de uma estrutura de casca funicular pelo processo de *form-finding* e com subdivisão de suas partes em peças e conexões para fabricação. Além de modelar a forma e verificá-la estruturalmente, o algoritmo desenvolvido prepara automaticamente o arranjo das peças numeradas para a sua materialização nas mesas de produção em máquinas CNC (*Computer Numeric Control*).

Resultados sobre o consumo de materiais, tempos de produção e custo das duas tipologias trabalhadas demonstram a viabilidade da implementação desta atividade didática complementar em cursos de Arquitetura. Além disso, corroboram com o entendimento sobre a importância do uso das tecnologias digitais no ensino de projeto e fabricação digital de formas arquitetônicas.

A experiência aqui retratada consistiu em experimentações do processo de projeto de cascas funiculares com funções de envoltória arquitetônica, de maneira integrada com as ferramentas de modelagem e fabricação digitais, sendo todo este processo condensado em um único algoritmo em um sistema CAD paramétrico.

Foram estudadas duas tipologias distintas de subdivisão da superfície, e construídos três protótipos em escala real e três maquetes em escala 1:3 a partir de atividades realizadas em duas escolas de arquitetura no Brasil: na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e na Universidade Federal da Bahia (UFBA). Foram utilizadas a modelagem paramétrica no *Rhinoceros* e o *Grashopper*, *form-finding* funicular e avaliação estrutural por simulação numérica através do *Karamba*, personalização em massa, fabricação digital e montagem destes produtos em diferentes materiais, configurando-se em exercícios que permitem experimentar a geração, análise e a produção da forma.

O uso do pavilhão experimental como recurso didático

A modelagem e fabricação de pavilhões como método experimental de ensino já se consolidou em diversos cursos de graduação e pós-graduação em Arquitetura, com resultados comprovados em termos de motivação, envolvimento dos alunos, trabalho em equipe e compreensão do processo de produção da forma como um todo (QUINTELLA; FERREIRA; FLORÊNCIO, 2016; SOLLY *et al.*, 2019).

Research Pavilion é a maneira mais frequente pela qual esta atividade é conhecida nas oficinas oferecidas por escolas de arquitetura no Brasil e em outros países e, neste artigo, a chamaremos de “Pavilhão Experimental”. Estas experimentações relatadas na literatura fazem o uso de diferentes sistemas estruturais, formatos dos pavilhões, sistema de conexões, processo de fabricação e montagem, além de uma diversa gama de materiais, como papelão, madeira, bambu, aço inox, alvenaria, pedra, ACM, acrílico, fibra de carbono etc.

Alguns casos de sucesso relatados em artigos e disponibilizados em vídeos na internet são o “Tornado” e o “Butterfly” (LAMo/UFRJ)¹ e “Slice” (USP)² no Brasil. Como exemplo internacional podem ser mencionados os diversos pavilhões anualmente produzidos no ICD/Itke da Universidade de Stuttgart³, inovando no projeto com a biomimética⁴, usando fibra de carbono como material para a estrutura e braços robóticos no processo de fabricação e/ou montagem. Também é importante mencionar a contribuição do projetista Marc Fornes⁵, cuja produção de pavilhões é extensa, inovadora, de formas complexas e inusitadas, aliando cores e formas harmonicamente. Seu escritório projetou e construiu pavilhões em diversas cidades ao redor do mundo.

Neste artigo, os relatos dos experimentos realizados nesta pesquisa com os pavilhões apontam para a necessidade de incorporar as ferramentas e métodos de fabricação digitais ao processo de projeto de formas arquitetônicas. Este parece ser o caminho para o estabelecimento da industrialização da construção personalizada em série, no que concerne às discussões sobre métodos de concepção de projetos para a materialização da arquitetura.

Projeto, fabricação digital e montagem de formas arquitetônicas

A literatura especializada no assunto (PIGRAM; MCGEE, 2011; MENGES; SCHWINN, 2012; RASPALL, 2015) traz diversos aspectos intervenientes que são importantes para o bom desempenho do projeto, fabricação e montagem de formas arquitetônicas, sobretudo com o uso da fabricação digital.

Raspall (2015) traz uma proposta de metodologia procedural de projeto para a fabricação (*design to fabrication*) desenvolvida a partir de experimentos de materialização arquitetônica com braços robóticos realizados por ele mesmo, inspirado nas experiências semelhantes de Pigram & McGee (2011) e Menges & Schwinn (2012). Raspall (2015) propõe, naquele estudo, um processo de projeto dividido em quatro elementos: 1) os objetivos (*the goals*); 2) instrumentos (*instruments*); 3) escopo (*scope*);

¹ Disponível em: <http://intervencoestemporarias.com.br/intervencao/inauguracao-do-pavilhao-tornado/>. Acesso em: 3 mar. 2020.

² Disponível em: <http://www.nomads.usp.br/wp/processos-design-arg/slice-pavilion/>. Acesso em: 3 mar. 2020.

³ Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/794506/pavilhao-de-pesquisa-icd-itke-2014-15-icd-itke-universidade-de-stuttgart>. Acesso em: 3 mar. 2020.

⁴ Biomimética é uma área da ciência que se inspira no meio ambiente e em estruturas biológicas para desenvolver soluções para problemas humanos.

⁵ Disponível em: <http://theverymany.com/project-gallery>. Acesso em: 3 mar. 2020.

e 4) fluxo de trabalho (*workflow*). Estes elementos trazem respectivamente a necessidade de se aproveitar as oportunidades de racionalização, de automação do processo de projeto e da personalização em massa (*mass customization*); a exploração dos limites do material como protagonista da base projetual, tendo a forma como a consequência do desempenho otimizado e atendendo aos requisitos do programa arquitetônico; a conexão entre a informatização do projeto e a fabricação; e a divisão do processo em três estágios: a) estudos exploratórios de sistemas e materiais; b) desenvolvimento e sistematização do processo de projeto; e c) prototipagem para produção. Assim, ao se conceber a materialização arquitetônica usando máquinas CNC a concepção do processo de projeto proposto por Raspall (2015) vem a ser uma opção para a integração entre projeto e materialização.

Outros estudos também trouxeram a expressa necessidade de se conceber o projeto de arquitetura relacionado ao desempenho do sistema através de simulações (OXMAN, 2008) e de se integrar o processo de projeto ao processo de produto (KOLAREVIC, 2009). Estas integrações vão no caminho da implementação ampla do BIM (*Building Information Modeling*) enquanto conceito de concepção, fabricação e manejo do produto (KANTERS; HORVAT, 2012).

Todo este processo de modelagem, simulação e fabricação se relaciona com o conceito do BIM e de gestão da informação, desde o projeto à sua destinação final. Eastman et al. (2011) trazem o histórico da evolução da modelagem digital, originando-se com o CAD modelando a geometria com elementos vetoriais, mas que não eram tratados como objetos ou classe de objetos, como postulado para os modelos BIM. Este último tem modelos com propriedades paramétricas e inter-relações entre os objetos da construção, considerando suas relações topológicas. Geralmente, os modelos BIM são concebidos em ferramentas especializadas baseadas nos conceitos da Programação Orientada a Objetos (POO), que definem os objetos da construção em classes que podem ser instanciadas em cada projeto. Apesar do modelo BIM tomar emprestado o conceito de POO para sistematizar o seu modelo digital em classes de objetos, tanto a própria ferramenta digital BIM, quanto a ferramenta CAD, podem ter a programação computacional da ferramenta em linguagem que opera no paradigma da POO.

O modelo paramétrico algorítmico aqui proposto e usado nas experiências realizadas não tem esta característica de usar a POO, mas funciona como uma classe de pavilhão onde todos os seus constituintes são gerados automaticamente a partir de uma programação procedural no Grasshopper (GH) que mantém as relações topológicas entre as partes do objeto. Neste sentido, pode-se afirmar que este modelo proposto carrega algumas características de um modelo BIM. A programação procedural é aquela que utiliza procedimentos, também conhecidos como rotinas ou funções. No GH, as funções são comumente chamadas de componentes e realizam operações específicas.

Ainda não é comum encontrar na literatura autores que identifiquem uma relação direta entre os modelos paramétricos geométricos criados no par de ferramentas digitais Rhinoceros/Grasshopper e modelos BIM. Usualmente, esta dupla de programas é utilizada na definição da geometria do objeto representado e normalmente pouco se chama atenção para estas enquanto potenciais definidores de um modelo de informação do edifício. Este modelo é mais frequentemente criado nas fases iniciais do projeto arquitetônico e importado para ser desenvolvido dentro dos chamados “programas autorais” (NIBS, 2007; TOBIN, 2008; SUCCAR; SHER; WILLIAMS, 2013).

No entanto, além de definir a geometria dos pavilhões, o modelo proposto foi construído com informações semânticas sobre os materiais que foram utilizados para a realização de simulações estruturais e otimização da fabricação e da montagem. A

estrutura de dados em árvore permitiu detalhar a conectividade das partes do pavilhão, quantificar peças e conexões, realizar orçamento da construção, estimar os tempos de produção e montagem e documentar o projeto, dentre outros usos comumente relacionados aos modelos BIM (KREIDER; MESSNER; DUBLER, 2010; CBIC, 2016). Em uma modelagem BIM, as informações semânticas são atributos adicionais, além da geometria, acrescidos em um modelo de objeto construtivo e que permitem explicitar propriedades deste objeto.

Deste modo, o modelo algorítmico proposto e codificado no GH possui a definição da geometria, propriedades do material, aspecto visual final, lógica de fabricação e de montagem. Estes modelos algorítmicos e paramétricos têm grande potencial para criar modelos de informação da construção, uma vez que é possível associar e manipular uma grande quantidade de dados do modelo geométrico paramétrico.

O BIM é um paradigma que, na sua dimensão de projeto para a fabricação digital, define como os dados semânticos são organizados, recebendo as definições geométricas e as propriedades do material provenientes do sistema CAD (*Computer Aided Design*); utilizando estes dados para a avaliação do objeto por simulações numéricas através dos sistemas CAE (*Computer Aided Engineering*) e extraíndo as informações geométricas para a fabricação compatíveis com os sistemas CAM (*Computer Aided Manufacturing*).

Todos estes dados que o modelo paramétrico e algorítmico proposto e usado nas oficinas possui podem ser acessados através da estrutura de dados em árvore de listas e a visualização da geometria no GUI (*Graphical User Interface*) da ferramenta CAD. Pode-se afirmar, portanto, que a modelagem utilizada possui características BIM, apesar de ter sido implementada em uma ferramenta CAD paramétrica e algorítmica, sendo ainda viável a transferência de dados para uma “ferramenta autoral” BIM, caso fosse necessário ampliar a representação de sistemas ou os usos do modelo.

Destaca-se também aqui o acelerado desenvolvimento de *plugins* para as ferramentas CAD paramétricas objetivando dar suporte à interoperabilidade com as ferramentas autorais BIM (principalmente o Revit e ArchiCAD, através de *add-ons* e *plugins* como o VisualARQ, RhinoBIM, Conveyor, dentre outros), e a diversidade de ferramentas que podem customizar os processos de projeto enfocando a necessidade generativa, da avaliação do desempenho ou do processamento da informação para a fabricação (HOLZER, 2016; CÔCO JÚNIOR; CELANI, 2021).

Isto reforça o entendimento sobre a necessidade de se discutir processos de projeto integrados entre as disciplinas envolvidas, além da necessidade de se ter uma formação transdisciplinar para projetistas de edificações arquitetônicas.

Método

Nesta pesquisa sobre as formas complexas arquitetônicas é considerado o paradigma científico da *Design Science* (DS), tendo como artefatos a forma da envoltória arquitetônica em estruturas de cascas, o processo de modelagem, sua fabricação digital e a montagem da estrutura. O DS vem a realizar o papel de desenvolvimento dos conhecimentos sobre os artefatos e seu processo de geração (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JÚNIOR, 2015).

Especificamente, o problema de pesquisa que se destina a resolver é a viabilidade construtiva da estrutura do pavilhão considerando os aspectos de modelagem paramétrica, fabricação digital e montagem, considerando como artefatos as tipologias dos pavilhões em si, o processo de modelagem, a concepção das conexões entre as peças da estrutura e o sistema de montagem. No que se refere à DS, esta pesquisa tem

por objetivo explorar e desenvolver o conhecimento da tectônica dos processos de construção de duas tipologias de pavilhões em termos da relação de sua exequibilidade envolvendo MP, FD e montagem.

Este estudo visa contribuir com o desenvolvimento do conhecimento transdisciplinar entre projeto da forma complexa arquitetônica e como viabilizar tecnicamente sua produção. As oficinas realizadas, por sua vez, foram oportunidades de verificar a efetividade e o funcionamento da interatividade do modelo algorítmico, generativo e paramétrico para produção destas formas por um público que não tinha necessariamente habilidades de modelagens nos sistemas computacionais ou experiência com fabricação digital e montagem de protótipos.

A oferta de cada oficina se configurou como um estudo exploratório de manipulação experimental em campo (MARCONI; LAKATOS, 2003) com o intuito de testar, de maneira exploratória, o uso de um modelo paramétrico predefinido, que inclui comportamento estrutural, como recurso de apoio ao desenvolvimento de projetos por estudantes ainda em fase de aprendizado, de modo a contribuir para sua formação em uma experiência que une o processo de projeto à produção. Além disso, há a importante observação da introdução dos participantes das oficinas aos conhecimentos básicos sobre modelagem paramétrica, fabricação digital e montagem de protótipos.

Como hipótese para realizar os estudos experimentais tinha-se a viabilidade de se produzir formas complexas através de oficinas com participantes iniciantes no assunto, contando com o auxílio de um modelo algorítmico, generativo e paramétrico previamente desenvolvido.

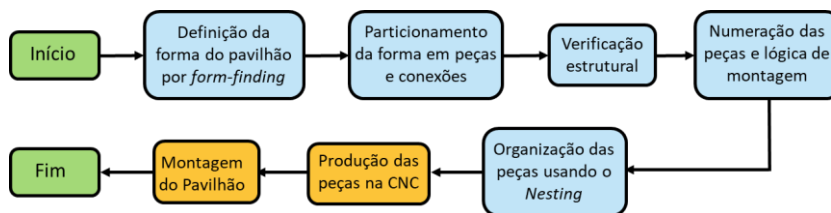
Os produtos e dados de desempenho das atividades realizadas visaram atestar a viabilidade do uso dos Pavilhões Experimentais como atividade complementar em cursos de Arquitetura e fornecer insumos que favoreçam a replicação destas oficinas em outros contextos e cursos, funcionando como uma prova de conceito sobre o uso do modelo proposto.

O modelo algorítmico, generativo e paramétrico usado nas oficinas

Inicialmente, foram desenvolvidas algumas alternativas de algoritmos para o projeto dos pavilhões que seriam criados nas oficinas, o que permitiu testar a facilidade de manipulação dos modelos e a viabilidade de sua fabricação com equipamentos de controle numérico. Foi concebido um código do GH com a capacidade de: (1) realizar a definição da forma funicular usando um *form-finding* funicular interativo; (2) definir o particionamento da forma em peças e seu sistema de conexão, considerando os processos de re-geração da subdivisão (*remesh*) e de planarização para o caso de malhas quadrangulares; (3) verificar a aceitabilidade estrutural através de simulação estrutural; (4) numerar as peças para o processo de montagem ordenado; e, (5) planificar e organizar as peças em folhas para produção (*nesting*) nos formatos das dimensões máximas das mesas das máquinas de corte CNC utilizadas. O fluxograma do modelo paramétrico algorítmico proposto e do processo de fabricação e montagem realizados é mostrado na Figura 1.

A implementação deste algoritmo em um código do GH possibilitou aos participantes das oficinas de projeto dos pavilhões terem facilidade na definição interativa da forma da casca funicular usando a técnica do *form-finding*, demandando poucas instruções no treinamento para se gerar a primeira proposta formal.

Figura 1 – Fluxograma algorítmico com o processo de projeto do pavilhão, desde a modelagem paramétrica codificada no GH (azul) até o processo de fabricação e montagem (amarelo)



Fonte: os autores.

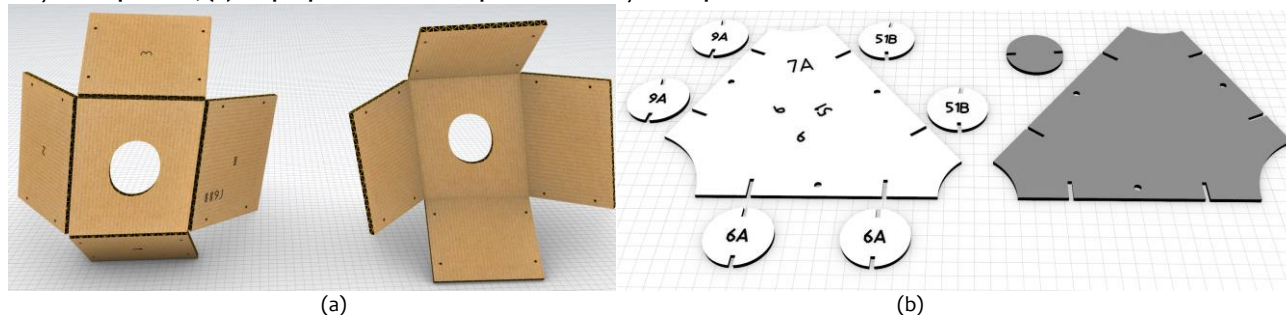
Esta técnica de *form-finding* define uma forma funicular a partir da entrada de uma forma plana discretizada em malha poligonal (*poligonal mesh*), na qual alguns pontos têm seu movimento liberado e outros ficam fixos, sendo estes últimos os apoios da estrutura funicular. Os pontos liberados são movidos na vertical pelo algoritmo do *form-finding* de modo a determinar uma forma funicular até uma altura máxima definida pelo usuário. Há na literatura uma grande diversidade de métodos de obtenção de formas funiculares de cascas (ADRIAENSSENS *et al.*, 2014). Nas oficinas aqui relatadas foi empregada a técnica que utiliza a convergência de grandes deslocamentos no modelo numérico estrutural. Essa técnica algorítmica está disponível no *add-on Karamba*.

O algoritmo do *form-finding* definido gera a forma considerando apenas três parâmetros de controle no projeto: (a) definição do formato da malha no plano horizontal, podendo ser entendida como a projeção da forma que será obtida; (b) definição de aberturas na forma e de pontos de apoio, conseqüentemente definindo os pontos da malha que estarão fixos; e (c) a definição da altura máxima da forma. Neste processo de definição da forma não se sabe qual será o resultado final até que o algoritmo seja executado, sendo possível controlar a forma interativamente, alterando os parâmetros de controle da geração pelo *form-finding* e executando o algoritmo iterativamente até obter uma forma que seja adequada ao que se pretende.

Foram definidas duas tipologias de subdivisão de superfícies funiculares que já foram experimentadas por outros autores. A primeira consiste em superfícies tesselladas por caixas quadrangulares conectadas por braçadeiras plásticas (NABONI, 2016) e a segunda em superfícies formadas por chapas triangulares conectadas por discos do mesmo material (TEPAVČEVIĆ *et al.*, 2017).

Na Figura 2 são apresentadas as duas tipologias de peças geradas pelo algoritmo proposto, após os aprendizados e experiências, usadas na subdivisão da superfície dos pavilhões em cascas funiculares.

Figura 2 – Tipologia das geometrias das peças dos pavilhões produzidos: (a) Caixas formadas por chapas com aletas conectadas por braçadeiras plásticas; (b) Chapas planas conectadas por discos e braçadeiras plásticas



Fonte: os autores.

Na Figura 2a se observa uma peça em forma de caixa com furos para ser unida às suas adjacentes usando braçadeiras plásticas, montando a peça e a estrutura

simultaneamente. Na Figura 2b se observa o segundo sistema, em que as peças são derivadas de triângulos e conectadas entre si através de peças circulares com cortes compatíveis para se estabelecer a conexão do tipo *slit*, também unidas com braçadeiras plásticas através de furos próximos aos pontos médios das arestas das peças.

Ainda na Figura 2 pode ser observada a codificação alfanumérica das peças para o sistema de montagem do pavilhão. No sistema de caixas amarradas (Figura 2a), a codificação consistiu em numerar as abas de peças diferentes que se avizinham com o mesmo número, codificando a peça também com um número e uma letra que auxiliam o processo de fabricação em lotes definidos pelas letras, associados também à sequência de montagem do pavilhão. De maneira semelhante, no sistema de peças planas derivadas de triângulos (Figura 2b), a sistemática se deu pela numeração de todos os discos de conexão, com numeração igual na peça, codificando com letras os lotes de corte e de sequência da montagem.

Nas Figuras 3 e 4 estão ilustrados alguns produtos que o algoritmo desenvolvido pode fornecer após a obtenção da superfície em malha poligonal, mostrando a geometria da superfície, algumas possibilidades de materialização, as simulações numéricas da estrutura e as informações resultantes do sistema instanciado (a forma representada nessas figuras não corresponde a um dos pavilhões construídos, sendo apenas um exemplo de modelagem possível).

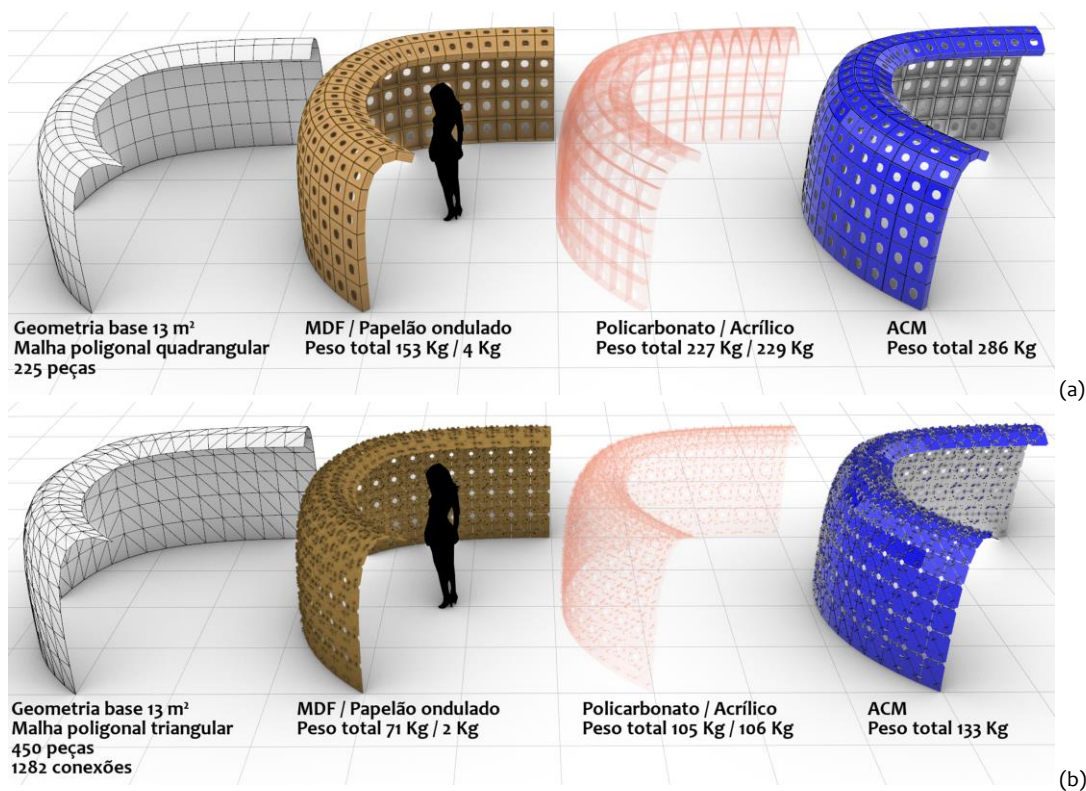
O exemplo apresentado na Figura 3 mostra que, para uma mesma geometria e, portanto, uma mesma área, a tipologia com peças em formato de caixas consome mais material. Contudo, ela possui um menor número de peças, o que pode resultar em uma montagem mais rápida. Os experimentos com estas duas tipologias possibilitaram observar seus desempenhos estrutural e estético e seus desempenhos na fabricação e montagem.

Em relação à viabilidade construtiva, a peça de forma triangular não apresenta um problema de planicidade, diferentemente do sistema com peças em caixas quadrangulares. No entanto, nesta última opção, a forma pode ser gerada como uma malha quadrilateral com faces planas, ou, caso possua faces não planares, pode ser aplicado um algoritmo de planarização de suas faces.

Ainda na Figura 3 pode ser observada, neste exemplo de instanciação do modelo, a quantidade de peças e conexões das duas tipologias, sendo este um fator que pode influenciar diretamente no tempo de montagem. A quantidade de material necessário nas duas tipologias também interfere no peso, o que pode influenciar a facilidade de manuseio e transporte das peças desmontadas. Diferentes possibilidades de materialização possibilitam diferentes resultados estéticos e funcionais que envolvem a transparência/opacidade, a adequação ao ambiente exterior e o custo de material para a produção do pavilhão.

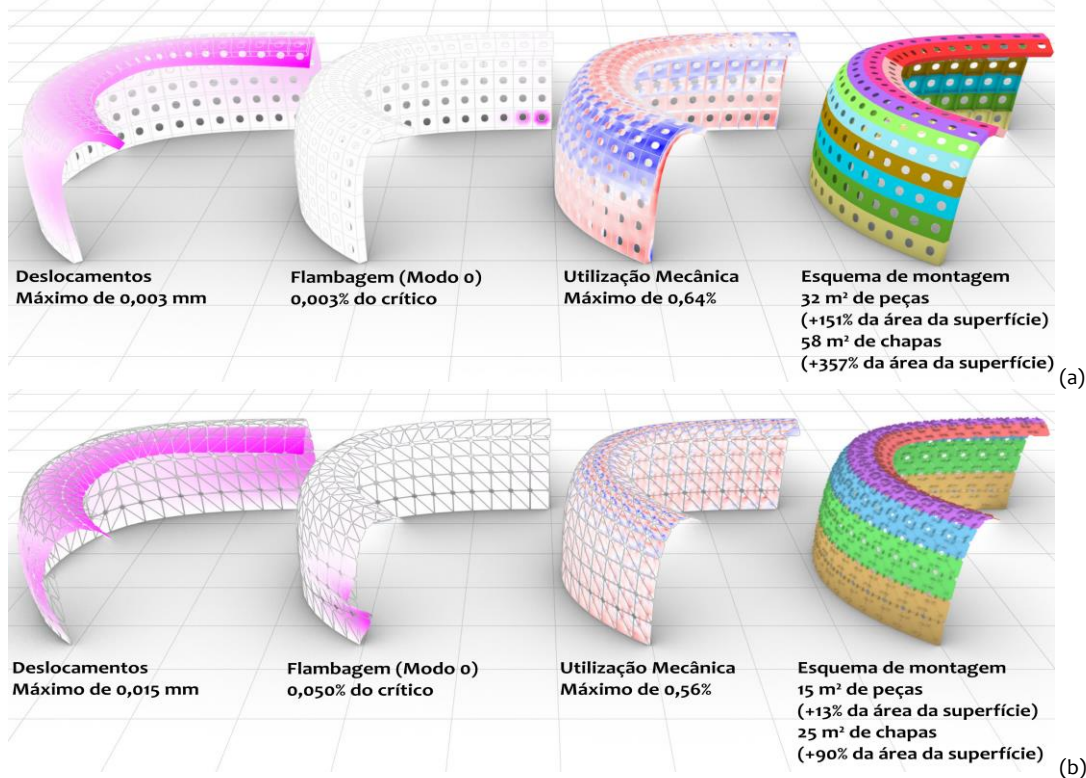
Na Figura 4 são ilustrados os resultados das simulações estruturais no *Karamba*, presente no fluxo do código do GH desenvolvido e com fins de verificação da aceitabilidade estrutural. Também está ilustrada na Figura 4 a separação da estrutura em grupos de peças para facilitar o processo de fabricação e montagem. É interessante observar que a subdivisão com peças em formato de caixas resulta em uma casca nervurada, que apresenta mais rigidez do que a versão com peças planas triangulares conectadas por discos.

Figura 3 – Geometria base em malha poligonal com algumas sugestões de materialização e suas características: (a) Sistema com peças quadrangulares em formato de caixas; (b) Sistema com peças triangulares e conexões por discos



Fonte: os autores.

Figura 4 – Resultado das simulações estruturais com identificação de deslocamento, flambagem e utilização mecânica, além do esquema de lotes para organizar a fabricação e a montagem: (a) Tipologia de caixas; (b) Tipologia de chapas triangulares



Fonte: os autores.

Observa-se na Figura 4 alguns parâmetros de desempenho estrutural (deslocamento máximo, criticidade à flambagem e à ruptura) e a somatória de área das peças, comparando-se com a área da superfície inicial da forma, além da área total das chapas que seriam utilizadas na produção (observando que existe sobra de área na chapa, devido ao formato das peças e seu plano de corte). Estes dados fornecidos pelo modelo podem auxiliar a concepção da forma nas fases iniciais, dando estimativas sobre o consumo de material a partir da área da superfície da forma e informando sobre a viabilidade estrutural e econômica da forma pretendida.

Avaliando a capacidade estrutural durante o processo de projeto, pode-se inclusive fazer alterações globais na forma, de modo a atender tanto à demanda de espaço arquitetônico quanto à aceitabilidade do comportamento estrutural em termos de deslocamentos, flambagem e esforços mecânicos. Além das questões estruturais, a modelagem 3D, também realizada algorítmicamente, permite verificar inadequações geométricas, como sobreposições de conexões, por exemplo. Sobre este aspecto, o código algorítmico proposto promove a verificação da adequação estrutural nas fases iniciais de projeto da forma, trazendo assim uma característica transdisciplinar ao processo de projeto.

Outro fator importante foi a intervenção manual permitida dentro do algoritmo desenvolvido, com o objetivo de separar as peças do pavilhão em lotes para a fabricação, obedecendo a uma lógica estrutural de montagem. Inicialmente, não foi feita esta distinção de separação das peças em lotes, e na primeira experiência de montagem do pavilhão foi necessária a tarefa extra de separar as peças antes de montar um grande quebra-cabeça. Após esta primeira experiência, foi possível perceber que antes de se preparar o arquivo para a fabricação, há uma oportunidade de se reorganizar as peças modeladas para serem fabricadas em lotes e serem montadas respeitando alguma lógica estrutural em um universo menor de procura de peças.

Dentro destas possibilidades de geração da forma da superfície funicular ou por qualquer abordagem geométrica imperativa, considerando estas duas tipologias de subdivisão em peças, existe um número incomensurável de formas que podem ser geradas pelo algoritmo desenvolvido, já automaticamente disponibilizando a verificação estrutural e os dados para a fabricação digital.

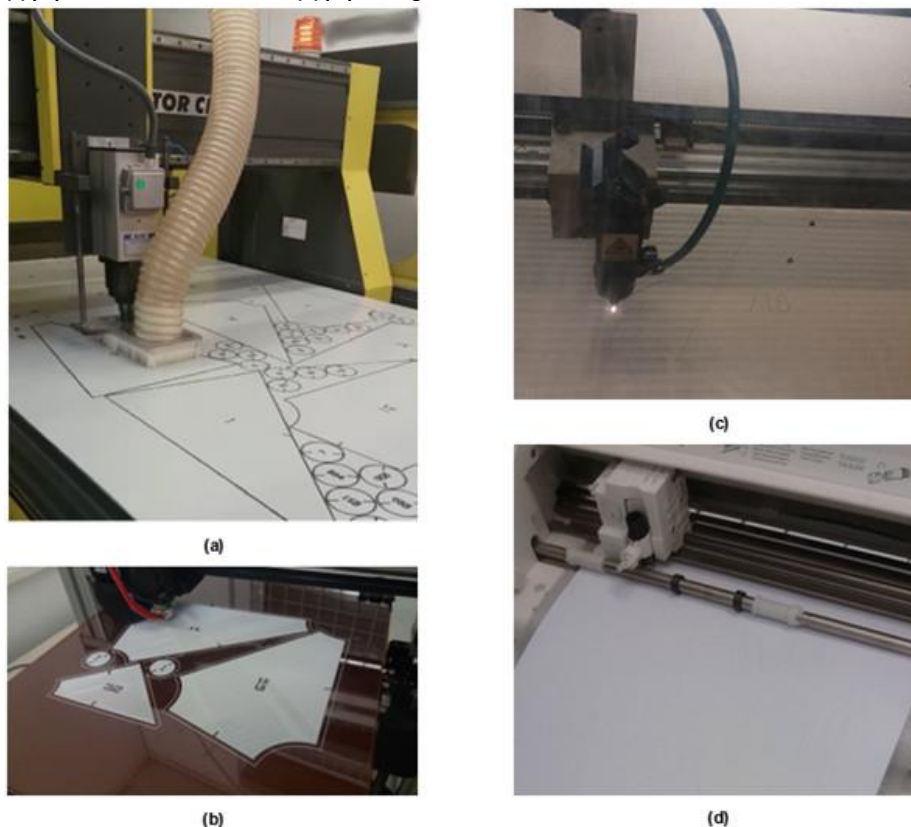
Na preparação para fabricação das peças há um processo chamado *nesting*, que consiste em distribuir de maneira otimizada as peças no formato padrão da mesa de fabricação digital ou da chapa a ser cortada. A última versão do código proposto usa o *add-on OpenNest* para o GH.

Para as máquinas de corte, sejam elas cortadora a lâmina, a laser ou a fresadora 2D, os modelos das peças geralmente são compostos por linhas e armazenados em arquivos de extensão .DXF. No caso da impressão 3D, o modelo deve ter algumas características para evitar erros de fabricação, como ter suas faces orientadas para fora do objeto e não se constituírem de superfícies abertas. Estes podem ser sólidos ou modelos de superfícies fechadas (*closed B-REPs*), sendo que estes últimos costumam apresentar menos erros na impressão 3D. Os modelos geométricos digitais de volumes devem ser convertidos no formato STL, formato usado para gerar o código responsável por orientar o traçado que a impressora fará durante a fabricação do objeto. É importante observar que neste experimento a impressora 3D foi usada para produzir peças planas e, apesar disto, mostrou ser uma alternativa interessante para produção de maquetes dos pavilhões em escala reduzida.

Na Figura 5 podem ser observadas imagens das peças nos diversos processos de fabricação experimentados. Pode-se observar que as peças são numeradas no modelo

digital, e as marcações são feitas automaticamente durante o processo de fabricação, o que permite que elas sejam identificadas para viabilizar o processo de montagem. Esta numeração foi concebida considerando a relação de vizinhança entre as peças, dentro do contexto em que o modelo digital da superfície está construído, a partir da manipulação de listas no processo de modelagem algorítmica do modelo proposto.

Figura 5 – Arranjo das peças nas mesas de fabricação digital utilizadas: (a) ACM na fresadora; (b) PLA na impressora 3D; (c) papelão na cortadora a laser; (d) papel 200g/m² na cortadora a lâmina



Fonte: os autores.

Em toda a experiência aqui relatada foram produzidas quatro formas diferentes. Foram fabricados pavilhões em escala real em alumínio composto (ACM) de 3,0 mm de espessura e em folhas de papelão ondulado de 3,0 mm e 6,0 mm. Já as maquetes na escala de 1:3 foram produzidas através de impressão 3D em PLA com filamento de espessura de 0,3 mm e em papel Cansom de 200 g/m² e Color Plus 180 g/m².

A escala 1:3 da maquete construída em PLA foi definida a partir da espessura da camada da impressora 3D utilizada. Na maquete aqui descrita procurou-se considerar três camadas para atingir a espessura total de cada peça impressa. Esta relação das espessuras na fabricação demonstrou ser relevante, pois a conexão entre as peças nestes casos depende da espessura dos materiais utilizados ou das características da impressora 3D empregada na produção dos componentes.

Descrição das oficinas

Em 2017 foi desenvolvida a primeira versão do modelo paramétrico algorítmico, foram realizados os primeiros testes de geração das instâncias, e foram feitos os experimentos de fabricação e montagem com voluntários. Após esta experiência inicial foram realizadas oficinas completas de modelagem, fabricação e montagem de outras instanciações a partir de versões melhoradas do modelo paramétrico desenvolvido.

A primeira forma concebida (Figura 6a) é caracterizada por ser uma forma livre dividida em peças quadriláteras em forma de caixas abertas que foram conectadas entre si por suas abas, formando uma superfície nervurada. Ela foi produzida inicialmente em uma maquete de papel 200 g/m², utilizando uma plotadora de recorte. Em seguida, foi produzido um protótipo em escala real em papelão ondulado de 3,0 mm de espessura, cortado em cortadora a laser. Esta tipologia foi inicialmente inspirada no trabalho realizado por Naboni (2016).

A segunda forma (Figura 6b) se assemelha a um parabolóide hiperbólico formado por chapas triangulares que foram conectadas entre si por discos ortogonais ao plano das peças. A maquete 1:3 foi produzida através de impressão 3D em PLA e o protótipo em escala real foi confeccionado em chapas de ACM cortadas por uma fresadora de 3 eixos. Esta tipologia foi inspirada no trabalho de Tepavčević *et al.* (2017).

Figura 6 – Primeiros modelos de teste das duas tipologias estudadas: (a) Modelo de caixas em papelão; (b) Modelo de peças em chapas triangulares conectadas por discos



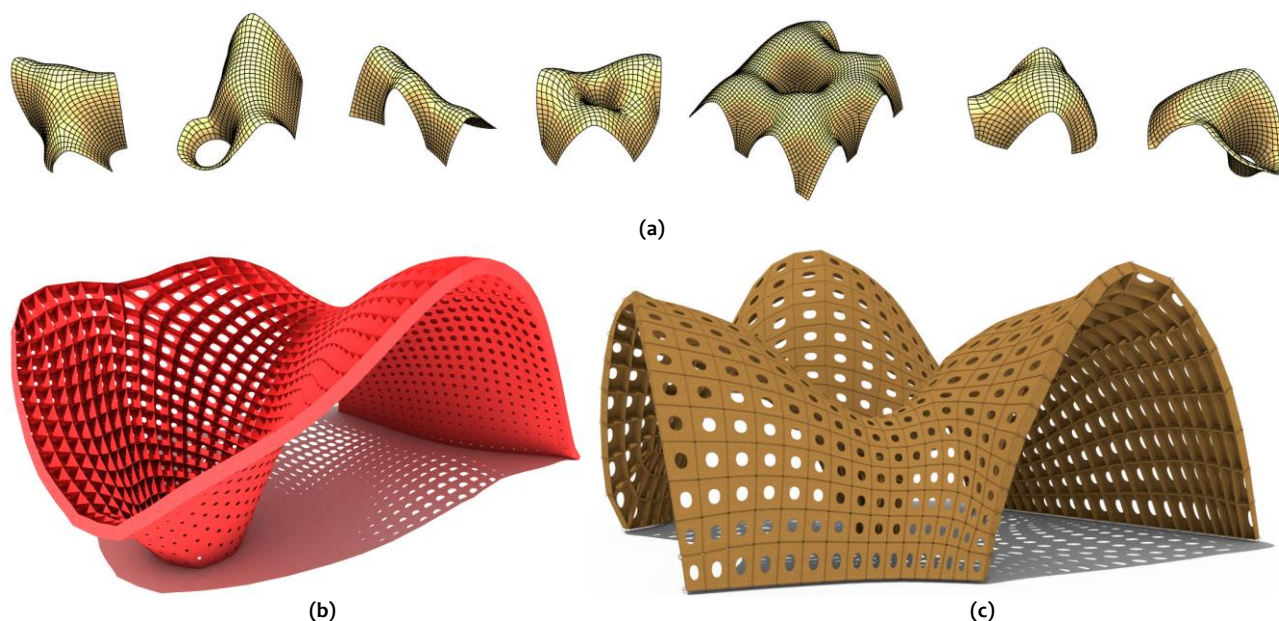
Fonte: os autores.

A experiência seguinte se deu por meio de oficinas que aconteceram nos anos de 2018 e 2019 e foram realizadas em três etapas distintas e sequenciais: (a) projeto da forma e preparação para fabricação digital; (b) fabricação de peças e, (c) montagem da casca funicular. Todo este processo foi realizado por alunos e professores de Faculdades de Arquitetura. O processo de projeto consistiu em uma oficina de geração de formas funiculares usando o código algorítmico proposto, onde cada participante pôde gerar a sua própria forma, a ser instalada em algum lugar da escola. A oficina de modelagem e projeto do pavilhão teve 7 participantes e cada um projetou seu próprio pavilhão a ser instalado nas dependências internas da escola, com uma área de superfície projetada no plano horizontal de no máximo 20 m².

O processo da oficina de projeto se deu pelo método de ensino-aprendizagem ativa, que pressupõe trabalho e protagonismo dos participantes na sua construção de conhecimento. Após orientação sobre como fazer o uso do algoritmo fornecido, o participante deveria desenvolver a geração e modificação da forma de acordo com sua intenção projetual até obter o resultado desejado (Figura 7a). Após 34 horas de oficinas de modelagem e projeto individual dos pavilhões, os participantes elegeram um dos projetos para ser fabricado em maquete de papel 180 g/m² utilizando cortadora a lâmina (Figura 7b) e outro para ser materializado em escala real em papelão 6,0 mm, utilizando cortadora a laser (Figura 7c). Estas duas instâncias, projetadas por dois participantes da

oficina, foram então preparadas para a fabricação e montadas colaborativamente pelos participantes da oficina, envolvendo ainda outros alunos voluntários.

Figura 7 – Produtos da oficina de projeto da forma: (a) Superfícies geradas pelos participantes; Modelos eleitos para materialização da (b) maquete (escala 1/3); (c) e do protótipo (escala 1/1)



Fonte: os autores.

Os autores das formas materializadas nomearam os objetos criados, surgindo assim o Blumen (Figura 7b) e o Antoni (Figura 7c). O nome Blumen (que significa flor em alemão) deve-se ao fato da primeira forma escolhida assemelhar-se a um buquê de flores. Já o nome Antoni foi dado à segunda forma escolhida em homenagem ao arquiteto espanhol Antoni Gaudí. Nomear os pavilhões é uma prática comum tanto nos Pavilhões Experimentais construídos no Brasil quanto no exterior e demonstra uma relação de afetividade e satisfação do projetista com o resultado obtido pelo seu trabalho.

Produtos da fabricação digital e montagem dos pavilhões

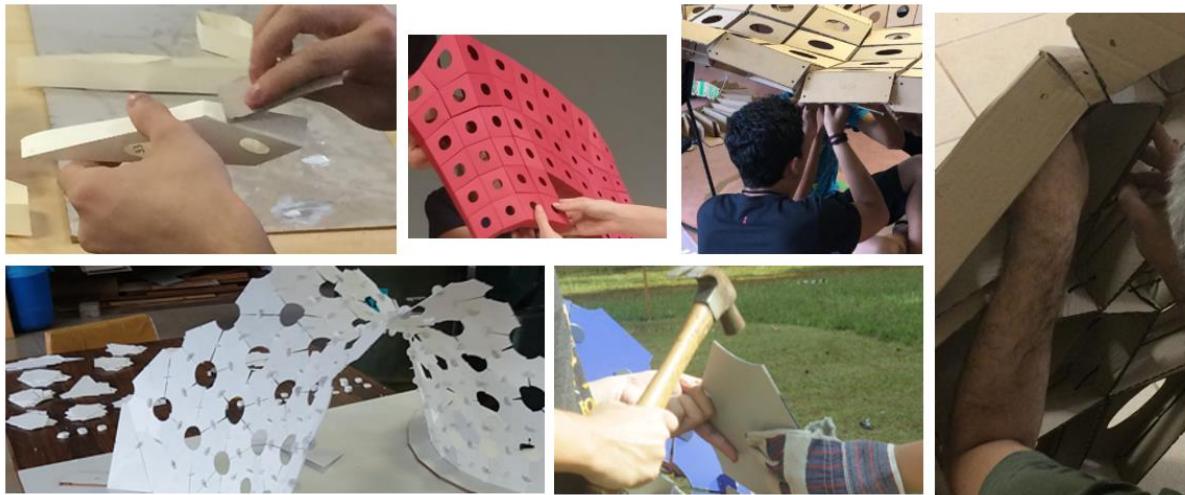
Na experiência de teste inicial todos os modelos foram fabricados e montados com relativo sucesso, trazendo alguns aprendizados na concepção da forma global, na concepção das conexões entre as peças e nos cuidados com a fabricação. Estes aprendizados e experiências retroalimentaram o processo, o que trouxe melhorias para o modelo algorítmico, generativo e paramétrico proposto, culminando com a definição das duas tipologias de peças estudadas, ilustradas pela Figura 2. A Figura 8 ilustra diferentes momentos das montagens realizadas durante o experimento inicial e nas oficinas posteriores, quando muitos alunos se voluntariaram, demonstrando ser esta uma atividade complementar valorizada por eles.

Na Figura 9 são apresentadas as imagens da maquete do parabolóide hiperbólico após a sua montagem. Pode ser observada nesta figura a numeração em baixo relevo nas peças, contidas também nos discos de conexão para a montagem correta.

Verificou-se uma fragilidade grande nestes discos de conexão na maquete, provavelmente por terem sido concebidos muito pequenos. Além disso, a dimensão de suas numerações em baixo relevo contribuiu para enfraquecer essas peças (não seria possível considerar um alto relevo, isso prejudicaria o encaixe e a montagem da estrutura). Ao se montar a maquete, foi possível notar que a forma resultante se aproximava muito do projeto desenvolvido digitalmente, apesar de demonstrar

algumas distorções nas linhas de conexão, sugerindo que o sistema de encaixe não limitou por completo os movimentos entre as peças. Este problema foi minimizado na proposta final, com o uso de dois discos por aresta conectada, além do uso de braçadeiras plásticas (Figura 2b).

Figura 8 – Registro dos processos de montagens realizados para as maquetes e os protótipos



Fonte: os autores.

Figura 9 – Imagens da maquete montada do parabolóide hiperbólico, formado por peças triangulares impressas em PLA



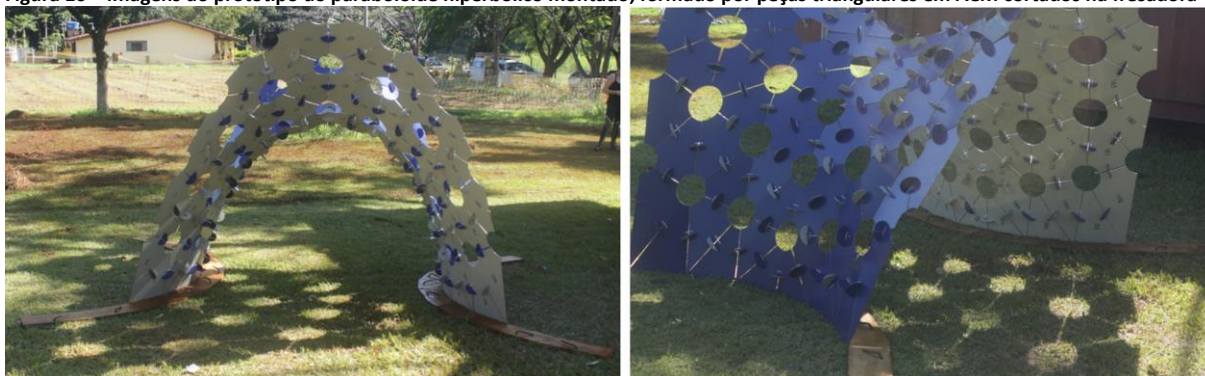
Fonte: os autores.

A Figura 10 apresenta as fotos do parabolóide hiperbólico na escala real em ACM após a montagem concluída. O protótipo do parabolóide hiperbólico foi montado em uma feira de design de interiores, ficando exposto à visitação. Devido à grande flexibilidade desta casca funicular na região das bordas de suas duas aberturas, algo que havia sido observado na análise estrutural de deslocamentos de segunda ordem e de suscetibilidade de flambagem, optou-se neste protótipo por não montar as duas últimas faixas da estrutura. Esta medida permitiu que a estrutura tivesse a rigidez necessária para a verificação de seu desempenho aos ventos e chuvas.

No processo de montagem também foi verificado que a conexão com um disco não enrijeceu bem a estrutura e não foi capaz de restringir os movimentos que tenderam a afastar as peças em regiões de ocorrência de esforços de tração. Por esse motivo, as peças foram amarradas junto aos discos de conexão, usando braçadeiras plásticas através de furos feitos nas peças (Figura 2b). Este protótipo ficou montado por várias semanas em espaço aberto, numa localidade de ocorrência de ventos fortes que podem chegar a velocidades elevadas.

Também foi registrado que esta estrutura ficou submetida a fortes temporais de chuva sem apresentação de quaisquer avarias. Este protótipo foi desmontado e será posteriormente montado em outra escola de Arquitetura em oficinas futuras.

Figura 10 – Imagens do protótipo do parabolóide hiperbólico montado, formado por peças triangulares em ACM cortados na fresadora



Fonte: os autores.

O segundo projeto de testes iniciais, de forma livre (sem dupla simetria), foi construído inicialmente em escala reduzida, em papel Cansom de 200 g/m², onde foi usada cola de papel para montar as peças e para conectá-las umas às outras. A Figura 11 apresenta as imagens dessa maquete, montada sobre uma chapa de compensado de 15 mm. Para apoiar o modelo nesta base foram fabricados quatro apoios em compensado de 25 mm com cortes 3D feitos com uma fresadora CNC, considerando a inclinação da casca nervurada no plano horizontal.

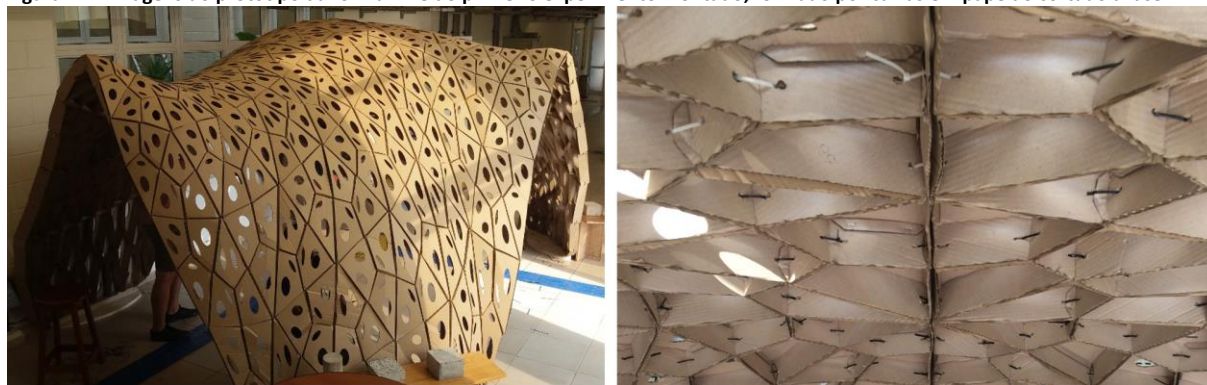
Figura 11 – Imagens da maquete da forma livre experimental montada, formada por peças em papel cortado na plotadora de recorte



Fonte: os autores.

A Figura 12 mostra as imagens desse mesmo projeto construído em escala natural em papelão ondulado. Esse protótipo, com 13,34 m² de projeção horizontal e 2,50 m de altura máxima, foi montado no corredor da escola de arquitetura da UNICAMP. A montagem deste modelo se deu pela união das peças utilizando braçadeiras plásticas, após a montagem individual utilizando grampos de papel. Cada nó de encontro das peças recebeu uma braçadeira plástica na meia altura da nervura.

Figura 12 – Imagens do protótipo da forma livre do primeiro experimento montado, formado por caixas em papelão cortado a laser



Fonte: os autores.

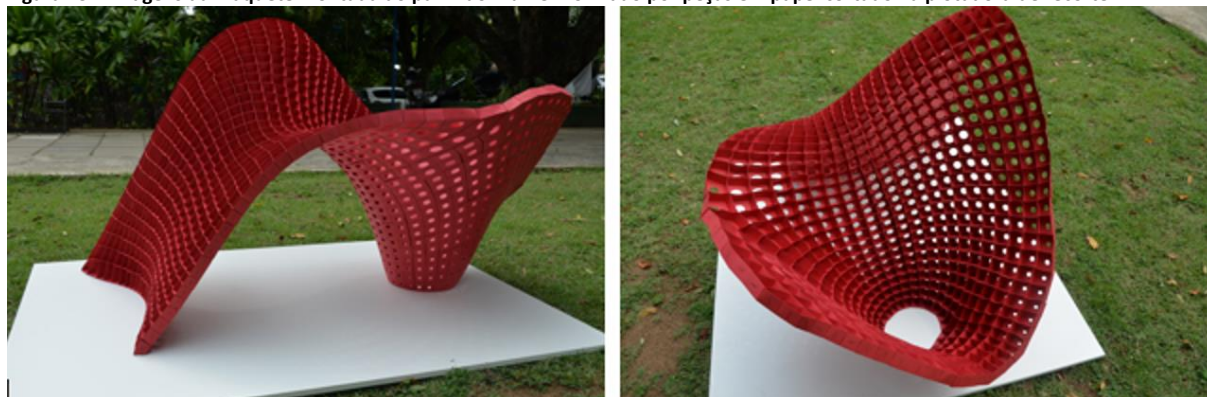
A estrutura deste protótipo (Figura 12) não apresentou um equilíbrio estável por completo, e por isso foram utilizados bancos de madeira com pesos para conter dois apoios de um lado do pavilhão, o que garantiu a sua estabilidade. Do outro lado, a parede também ofereceu contenção. Sem os apoios da parede e dos bancos esta estrutura não teria capacidade de atingir o equilíbrio. Essa instabilidade foi resultado dos empuxos horizontais do arco, mas foi também exacerbada pela falta de rigidez da estrutura, devido à pequena espessura do papelão usado (3,0 mm), o tamanho da aba que forma a nervura (8,0 cm) e, principalmente o tipo de conexão usado, que configurou uma ligação rotulada. Apesar do pavilhão ser uma casca funicular, percebe-se aqui a necessidade de se considerar uma ligação rígida (engastada) para se ter inclusive a capacidade de absorção de esforços que não são os gravitacionais, como o vento, por exemplo.

A concepção dos pavilhões Blumen e Antoni, na segunda fase de experimentos com a realização das oficinas, consistiu em uma atualização e melhoramentos de alguns aspectos do código algorítmico, implementados a partir da experiência obtida no teste inicial. Desta vez, após a obtenção da forma curva por *form-finding*, foi gerada uma malha a partir das linhas de compressão e de tração da casca funicular obtida, direcionando assim as linhas em que as nervuras estruturais estariam dispostas, aumentando a eficiência estrutural e, conseqüentemente, melhorando a rigidez e diminuindo os níveis de esforços da peça. Estas linhas de esforços de compressão e tração foram fornecidas pela simulação do *Karamba* e usadas como dado de entrada de uma segunda subdivisão da forma (*remesh*) pela ferramenta *Evolute tools*.

Uma outra otimização realizada foi a concepção de um grid quadrilateral, reduzindo o número de nervuras que chegam a um nó. No primeiro experimento, com as peças triangulares, chegava-se a até 6 nervuras em cada nó da casca estrutural. Para isso, houve a necessidade de se obter um grid curvo formado por peças quadrangulares, que deveriam ser planas (ou o mais próximo possível de formas planas) de modo a permitir sua fabricação com chapas cortadas.

A Figura 13 apresenta as imagens da maquete produzida na segunda edição deste experimento com pavilhões de pesquisa (Blumen), produzida em papel Color Plus 180 g/m² na cor vermelha. Todas as peças foram montadas individualmente, colando as suas abas e, posteriormente, todas as peças foram unidas usando cola também. Esta maquete foi montada sobre uma chapa de MDF, na qual as bases da estrutura foram fixadas, provendo assim boa estabilidade para a forma.

Figura 13 – Imagens da maquete montada do pavilhão Blumen formado por peças em papel cortado na plotadora de recorte



Fonte: os autores.

A Figura 14 apresenta as imagens do pavilhão nomeado Antoni, montado no interior da biblioteca da faculdade de Arquitetura da UFBA em que esta edição da experiência aconteceu. O pavilhão Antoni, com 2,67 m de altura, foi montado com o uso de duas braçadeiras plásticas nos vértices das peças quadrangulares, como pode ser visto na Figura 14, em contraponto a apenas uma braçadeira plástica usada no primeiro protótipo (Figura 12).

O uso destas braçadeiras duplas garantiu a continuidade mecânica estrutural das nervuras, provendo assim resistência à flexão no sentido do maior momento de inércia, o que aumentou sua rigidez e sua capacidade de resistência mecânica e estabilidade. Além destas modificações em relação ao protótipo em papelão feito anteriormente (Figura 12), foi considerada uma espessura do papelão de 6,0 mm e uma altura de nervura de 10,0 cm, contribuindo também para uma maior rigidez do sistema em relação à experiência anterior. Todas as peças em contato com o piso foram fixadas com o uso de fitas adesivas dupla-face.

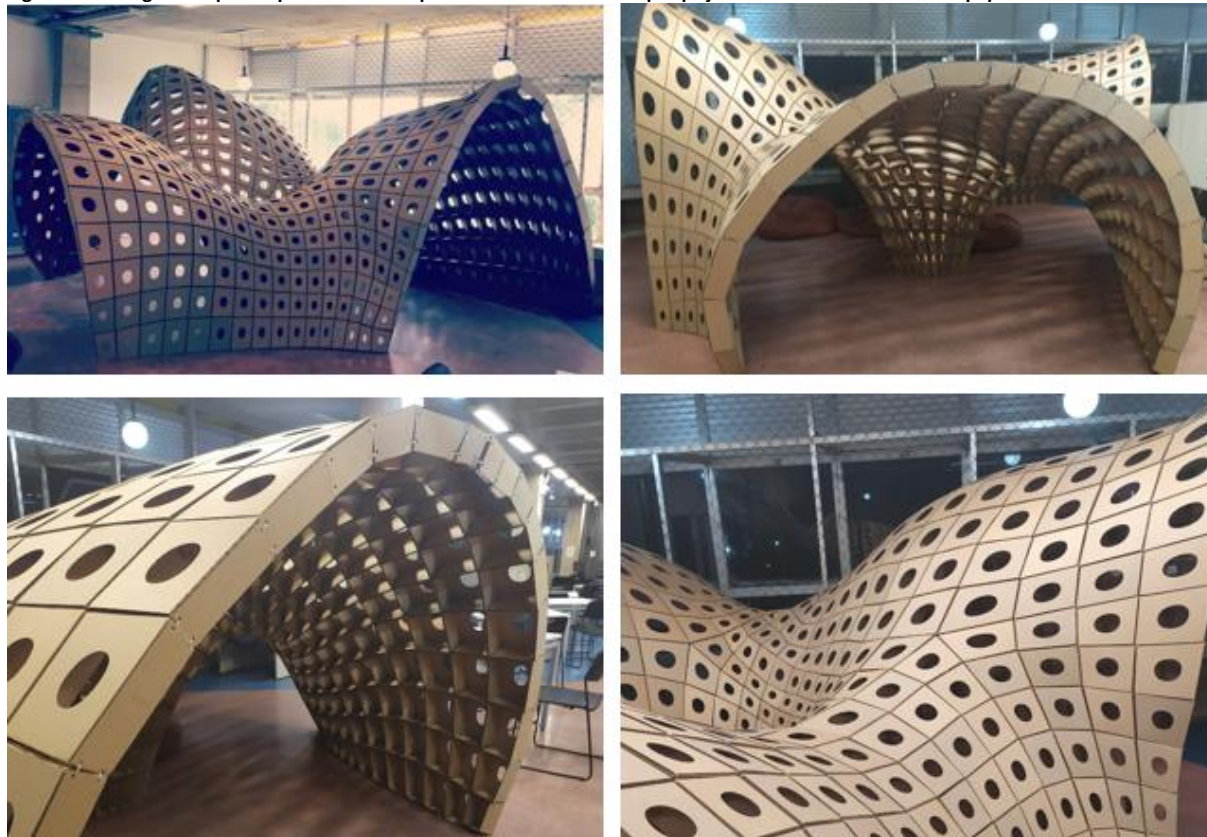
Foi observado que, desta vez, com os ajustes no projeto e na fabricação, proporcionados pelas primeiras experimentações, o Antoni não apresentou nenhuma dificuldade em manter seu equilíbrio sozinho, demonstrando uma excelente estabilidade e rigidez. Percebeu-se também que, tanto nas simulações estruturais quanto nos protótipos construídos, as regiões de maiores curvaturas das cascas apresentaram maior rigidez. Além disto, apesar de ter aberturas tão grandes quanto o protótipo de papelão construído anteriormente, o Antoni tinha menores vãos livres, o que também contribuiu para uma maior rigidez geral da estrutura.

No primeiro protótipo da forma livre em papelão (Fig. 12), cada peça foi montada individualmente, utilizando grampos de papel, para depois serem conectadas umas às outras, utilizando as braçadeiras plásticas. No caso do Antoni (Fig. 14), cada peça foi montada à medida que era conectada às suas vizinhas, utilizando apenas pares de braçadeiras plásticas nos nós de conexão. Os apoios que foram considerados nos modelos da primeira edição da experiência não foram mais necessários na segunda edição, com a fabricação do Blumen e o Antoni, uma vez que esses modelos já foram concebidos com a geometria do contato das peças ajustado com o plano da base.

O Quadro 1 apresenta o resumo das características das maquetes e protótipos construídos nestas experiências, incluindo os tempos de produção e os custos totais de materiais. A produtividade de fabricação e montagem estão em unidades de hora-máquina e hora-pessoa, respectivamente, enquanto a taxa de produtividade da montagem informando a quantidade de peças que uma pessoa montou em uma hora, em média, foi dada em peças/hora-pessoa. A forma livre experimental em papelão teve

o custo de material computado apenas referente às braçadeiras plásticas utilizadas nas conexões entre as peças, uma vez que todo o papelão foi doado.

Figura 14 – Imagens do protótipo montado do pavilhão Antoni formado por peças em formato de caixas em papelão cortados a laser



Fonte: os autores.

Observa-se no Quadro 1 que, nos casos dos pavilhões em papelão produzidos em escala real, houve um grande aumento da velocidade de montagem ao separar as peças em lotes desde a sua fabricação.

Quadro 1 – Resumo das informações de fabricação e montagem dos pavilhões

Modelo	Material	Máquina	Qtde. peças	Fabricação (h-máq.)	Montagem (h-pessoa)	Taxa montagem (peça/h-pessoa)	Custo do material (R\$)
Paraboloide hiperbólico 1:3	PLA	Impressora 3D	200	49	90	2,2	200,00
Paraboloide hiperbólico 1:1	ACM 3,0 mm	Fresadora 3 eixos	200	30	40	5,0	1.500,00
Forma livre experimental 1:3	Papel 200 g/m ²	Cortadora a lâmina	756	16	90	8,4	400,00
Forma livre experimental 1:1	Papelão 3,0 mm	Cortadora laser	756	88	315	2,4	150,00 (apenas as braçadeiras)
Blumen 1:3	Papel 180 g/m ²	Cortadora a lâmina	1060	30	62*	17,1	380,00
Antoni 1:1	Papelão 6,0 mm	Cortadora laser	810	80	65	12,5	1.100,00

Nota: * No caso do Blumen, sua montagem se deu também no período do corte. Enquanto as folhas eram cortadas, as peças já cortadas eram coladas. Desta forma, das 62 horas de montagem, 30 foram simultâneas ao corte e 32 horas foram para a união das peças e montagem final do pavilhão. Fonte: os autores.

No Quadro 2 podem ser observadas as taxas de consumo de material que se deram no processo de fabricação dos pavilhões estudados, ficando evidente que é necessária uma

quantidade muito maior de área bruta de chapas em relação à área útil de chapas planas utilizada, sobretudo na tipologia estrutural que considera nervuras.

Quadro 2 – Taxas de consumo de material nos modelos físicos construídos

Modelo	Material	Consumo bruto de material	Projeção de área coberta	Taxa por área projetada	Área da superfície curva	Taxa por área da superfície
Paraboloide hiperbólico 1:3	PLA	2,0 Kg	0,77 m ²	2,59 Kg/m ²	1,37 m ²	1,46 Kg/m ²
Paraboloide hiperbólico 1:1	ACM 3,0 mm	18,3 m ²	6,89 m ²	2,65 m ² /m ²	12,30 m ²	1,49 m ² /m ²
Forma livre experimental 1:3	Papel 200 g/m ²	200 fls A3	1,48 m ²	136 fls/m ²	2,58 m ²	78 fls/m ²
Forma livre experimental 1:1	Papelão 3,0 mm	191,16 m ²	13,34 m ²	14,33 m ² /m ²	23,27 m ²	8,21 m ² /m ²
Blumen 1:3	Papel 180 g/m ²	140 fls A3	1,14 m ²	123 fls/m ²	1,90 m ²	74 fls/m ²
Antoni 1:1	Papelão 6,0 mm	209,52 m ²	13,80 m ²	15,18 m ² /m ²	25,26 m ²	8,29 m ² /m ²

Fonte: os autores.

Observa-se no Quadro 2 o consumo superior de material da tipologia em cascas nervuradas fabricada com peças em forma de caixas, chegando a apresentar um consumo até mais de seis vezes ao da tipologia de chapas triangulares conectadas por discos, observado no caso dos protótipos. Contudo, a tipologia da casca nervurada apresentou um melhor desempenho estrutural e uma maior capacidade de formar uma superfície impermeável quando comparada à outra tipologia estudada.

Discussões

O desempenho do modelo algorítmico, generativo e paramétrico, aperfeiçoado em cada experimento realizado, demonstrou sua eficácia e eficiência enquanto um meio viável e simples de se trabalhar formas complexas arquitetônicas com alunos dos primeiros anos do curso de graduação. O uso de um algoritmo que já tem em si a automação do processo de geração e avaliação estrutural da forma possibilitou que usuários sem conhecimentos avançados em desempenho estrutural, modelagem e fabricação digital pudessem criar composições de formas complexas. Isso permite concluir que o modelo proposto pode ser um recurso de integração de trabalho colaborativo e transdisciplinar entre arquitetos e engenheiros. Por incluírem um desenvolvimento completo, desde a modelagem algorítmica com simulação estrutural até a materialização das formas por fabricação digital e sua montagem, as oficinas descritas neste artigo serviram como prova de conceito da viabilidade de se introduzir a estudantes de graduação questões emergentes nas áreas de projeto de arquitetura e engenharia estrutural, possibilitando integrar conceitos e oferecer uma visão panorâmica do processo, contribuindo para seu processo de formação.

A característica interativa e automatizada deste código possibilitou experimentar o seu uso em oficinas com a participação de indivíduos que não tinham necessariamente conhecimento de programação ou dos softwares Rhinoceros e Grasshopper, mas que conseguiram desenvolver seus projetos utilizando o algoritmo interativo fornecido.

A julgar pelos produtos obtidos nas oficinas, as experiências realizadas permitiram aos participantes construir conhecimentos importantes e necessários para a formação atual do estudante de arquitetura. Para além da introdução aos conteúdos relacionados com projeto paramétrico e fabricação digital, vale destacar como importantes aquisições:

- a) reflexão e discussão, durante as atividades práticas, sobre processos de concepção da forma arquitetônica e suas implicações na viabilidade construtiva dos objetos projetados;
- b) experimentação de tecnologias ainda pouco exploradas, com a conscientização dos estudantes sobre a necessidade de atualização constante do profissional e de postura proativa e participativa na sua construção de conhecimento;
- c) discussão sobre a necessidade de haver reflexão e amadurecimento dos processos e métodos de trabalho, principalmente aqueles que lidam com novas tecnologias;
- d) possibilidade de vivenciar nas oficinas todo o ciclo de projeto e construção de um objeto arquitetônico projetado pelo estudante;
- e) aumento da conscientização sobre a escala dos objetos e sua implicação na materialidade do mesmo, por meio da comparação entre as maquetes e os protótipos e as consequências da mudança de escala do objeto arquitetônico;
- f) valorização do trabalho em grupo durante a fabricação e a montagem destes pavilhões, onde cada um teve um papel e responsabilidade que interfere no resultado final a ser alcançado.

Dentre as dificuldades identificadas na oferta das oficinas, podem ser citadas:

- a) projetar e executar um pavilhão, desde a sua concepção até sua montagem, em equipe, exige um trabalho intenso e contínuo, que pode levar muito tempo se não for bem planejado e articulado em detalhes;
- b) os cursos de graduação no Brasil possuem carga horária elevada, o que não estimula uma dedicação a um trabalho como este, em formato de extensão ou voluntário, ao longo de várias semanas;
- c) o tempo disponível em um semestre em geral é suficiente para realizar todo o processo de modelagem paramétrica e fabricação digital. Contudo, imprevistos, como a quebra de máquinas e de componentes, a falta de material, disponibilidade do laboratório etc. podem prejudicar o cronograma. Por isso, um planejamento rigoroso, incluindo alternativas com relação ao uso de equipamentos, deve ser estabelecido;
- d) em uma oficina, normalmente é possível trabalhar apenas um tipo de solução em termos de material e estruturação, devido ao tempo e infraestrutura necessária.

Outra dificuldade é o envolvimento de uma turma com muitos alunos em um projeto único. Como atribuir uma tarefa específica para cada aluno ou pequeno grupo, de modo que todos participem efetivamente? Como aproveitar estas oportunidades para efetivamente gerar inovações, ao invés de simplesmente repetir padrões já testados em universidades do exterior? Como manter o compromisso do aluno com o projeto por um longo período de tempo? Estas questões organizacionais ainda precisam ser aperfeiçoadas, de modo a permitir a escalabilidade das oficinas, tendo em vista o crescente interesse dos alunos por este tipo de atividade.

Uma dificuldade que chamou muita atenção foi o tempo necessário para a preparação e coordenação das atividades, que envolvem a divulgação das oficinas, o preparo dos algoritmos a serem disponibilizados, o acompanhamento do desenvolvimento dos projetos, o preparo e fabricação das peças, a coordenação com os laboratórios de

fabricação (adequação aos horários disponíveis), a organização para compra de suprimentos e para distribuição de tarefas entre os participantes, dentre outras.

Conclusões

Este artigo apresentou uma proposta de processo de projeto de cascas arquitetônicas utilizando a exploração de um modelo algorítmico, generativo e paramétrico que considerou a forma, o desempenho estrutural, a fabricação e a montagem do objeto. O projeto e a construção dos pavilhões ajudaram a entender melhor os encaixes e o funcionamento estrutural das duas tipologias de cascas estudadas. O processo de projeto transdisciplinar com o auxílio de um modelo algorítmico, generativo e paramétrico teve sua eficácia aumentada ao longo dos experimentos, à medida em que se passou a entender melhor todos os *plugins* e ferramentas responsáveis por cada etapa do algoritmo proposto durante esta pesquisa.

Quanto ao processo de construção e avaliação dos artefatos, tendo como método os estudos exploratórios de manipulação experimental, puderam trazer com clareza a importância do código alfanumérico de montagem que foi marcado nas peças durante a sua fabricação. O agrupamento das peças de acordo com o processo de montagem, codificadas por letras, propicia um processo de fabricação com as peças já organizadas em lotes, facilitando a montagem. Verificou-se também que a montagem com a numeração casada entre peças mostrou melhores resultados quando combinada ao uso de tabelas e do mapa de montagem.

Não restam dúvidas sobre os ganhos e vantagens na realização destas atividades, e a consciência que a cada oficina, ainda que os produtos criados fossem diferentes, os métodos e processos iam sendo mais amadurecidos e consolidados. Diante disto, fica também a reflexão de que estas são atividades que exigem muito dos docentes coordenadores, cuja atividade de pesquisa garante sua constante atualização com relação às tecnologias e o aproveitamento dos resultados como fonte de reflexão e discussão.

Por caminho semelhante, mas com detalhamentos distintos, poderiam ser concebidos pavilhões utilizando processos similares aos discutidos aqui e utilizando outros materiais como bambu, aço, madeira, plásticos etc. Para tal, deve ser desenvolvido um sistema de conexão próprio para cada caso de acordo com a sua forma geométrica e material componente. Em relação ao comportamento estrutural, foi observado que todas estas cascas apresentam menor rigidez em regiões de curvaturas simples, e maior rigidez em regiões de duplas curvaturas. Outro aspecto estrutural importante foi a observância da grande dependência da fixação dos apoios da estrutura para garantir a estabilidade global.

Apesar da melhoria da rigidez após o aprimoramento do sistema de conexões (Figura 2), ainda há alguma incerteza sobre a fidedignidade do modelo em relação ao comportamento do sistema estrutural real, sobretudo sobre o valor do módulo elástico e do valor da resistência do material. Foram considerados valores de referência encontrados na literatura tanto para o papelão quanto para o ACM, contudo, o ideal seria ensaiar esses materiais em laboratório para garantir a acurácia do modelo preditivo estrutural. Portanto, devem ser realizados estudos mais aprofundados sobre este sistema, tanto em modelos estruturais mais refinados a exemplo de modelos de elementos finitos com elementos sólidos e elementos de contato, quanto novas provas de conceito considerando uma menor incerteza sobre os valores de resistência do material e módulo elástico.

Finalmente, os resultados dos quadros apresentados podem servir para estimativas de uso de material em futuras investigações sobre pavilhões nestas tipologias ou em casos semelhantes a este, tanto no quantitativo de materiais quanto nos índices de produtividade de fabricação e de montagem.

Nas oficinas, apenas conteúdos introdutórios sobre modelagem paramétrica e fabricação digital foram discutidos. Ainda que tenha sido possível identificar diversas vantagens no formato da oficina, possibilitar que esse tipo de experimentação faça parte das matrizes curriculares, permitindo desenvolver habilidades e aprofundar questões relativas ao projeto paramétrico e à fabricação digital é fundamental para melhor formar os estudantes para o cenário de produção arquitetônica atual e futura.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio através do Edital Universal MCTI/CNPq n. 01/2016 e às Pró-Reitorias de Pesquisa, Criação e Inovação e de Ensino de Pós-Graduação da Universidade Federal da Bahia, pelo apoio através do EDITAL PROPCI/PROPG – UFBA 004/2016. Agradecem também o apoio oferecido pela FECFAU da Universidade Estadual de Campinas e pela Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia, e aos alunos que fotografaram os modelos e cederam as fotos para este artigo, além das diversas colaborações dos participantes das oficinas realizadas.

Referências

ADRIAENSSENS, S.; BARNES, M.; HARRIS, R.; WILLIAMS, C. Dynamic Relaxation: Design of strained timber gridshell. In: ADRIAENSSENS, S.; BLOCK, P.; VEENENDAAL, D.; WILLIAMS, C. (org.). **Shell structures for architecture: Form Finding and Optimization**. New York: Routledge. p. 89-101. 2014

CBIC - CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Fundamentos BIM: Parte 1 - Implantação do BIM para Construtoras e Incorporadoras**. Brasília: CBIC, 2016. 120 p. (Guia BIM. Building Information Modeling, v. 1)

CÔCO JÚNIOR, V. H.; CELANI, G. Algoritmização do projeto arquitetônico em BIM: uma aplicação na indústria de banheiros pré-fabricados. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 16, n. 2, abr./jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.11606/gtp.v16i2.181038>.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. **Design Science Research: Método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015. 181 p.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM Handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors**. 2th ed. New Jersey: John Wiley, 2011. 648 p.

HOLZER, D. Design exploration supported by digital tool ecologies. **Automation in Construction**, v. 72, pt. 1, p. 3-8, Dec. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.07.003>.

KANTERS, J.; HORVAT, M. The design process known as IDP: a discussion. **Energy Procedia**. v. 30, p. 1153-1162, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.128>.

KOLAREVIC, B. Towards integrative design. **International Journal of Architectural Computing**. v. 7, n. 3, p. 335-344, Sept. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1260/147807709789621248>.

KREIDER, R., MESSNER, J.; DUBLER, G. Determining the Frequency and Impact of Applying BIM for Different Purposes on Building Projects. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATION IN ARCHITECTURE, ENGINEERING AND CONSTRUCTION (AEC), 6., 2010, Loughborough. **Proceedings [...]**. Loughborough: AEC, 2010. p. 9-11.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003. 311 p.

- MENGES, A.; SCHWINN, T. Manufacturing Reciprocities. **Architectural Design**. v. 82, n. 2, p. 118-125, Mar. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/ad.1388>.
- NABONI, R. Form-Finding to fabrication of super-thin anisotropic gridshell. In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBERO-AMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 20., 2016, Buenos Aires. **Proceedings [...]**. Buenos Aires: SIGraDi, 2016. p.318-325. DOI: [10.5151/despro-sigradi2016-807](https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2016-807).
- NIBS. NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES. **National building information modeling standard**. Version 1 – Part 1: Overview, principles and methodologies. Washington, 2007. 183 p. Disponível em: https://buildinginformationmanagement.files.wordpress.com/2011/06/nbimsv1_p1.pdf. Acesso em: 13 out. 2020.
- OXMAN, R. Performance-based Design: Current practices and research issues. **International Journal of Architectural Computing**. v. 6, n. 1, p. 1-17, Jan. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1260/147807708784640090>.
- PIGRAM, D; MCGEE, W. Formation Embedded Design: A methodology for the integration of fabrication constraints into architectural design. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE - ACADIA, 31., 2011, Banf. **Proceedings [...]**. Banf: ACADIA, 2011. p. 122-131. DOI: <https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2011.122>.
- QUINTELLA, I. P. C. P.; FERREIRA, I. C.; FLORÊNCIO, E. Q. Making Pavilions: os pavilhões temporários no contexto das faculdades de arquitetura e urbanismo. In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBERO-AMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 20., 2016, Buenos Aires. **Proceedings [...]**. Buenos Aires: SIGraDi, 2016. p. 318-325. DOI: [10.5151/despro-sigradi2016-483](https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2016-483).
- RASPALL, F. A Procedural framework for design to fabrication. **Automation in Construction**. v. 51, p. 132-139, Mar. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.12.003>.
- SOLLY, J.; FRÜH, N.; SAFFARIAN, S.; ALDINGER, L.; MARGARITTI, G.; KNIPPERS, J. Structural design of a lattice composite cantilever. **Structures**, v. 18, n. 5, p. 28-40, 2019. DOI: [10.1016/j.istruc.2018.11.019](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.019).
- SUCCAR, B.; SHER, W.; WILLIAMS, A. An integrated approach to BIM competency assessment, acquisition and application. **Automation in Construction**. v. 35, Nov. 2013. p. 174-189. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.016>.
- TEPAVČEVIĆ, B.; STOJAKOVIĆ, V.; MITOV, D.; BAJŠANSKI, I.; JOVANOVIĆ, M. Design to fabrication method of thin shell structures based on a friction-fit connection system. **Automation in Construction**. v. 84, p. 207–213, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.003>.
- TOBIN, J. AtomicBIM: Splitting data to unleash BIM’s power. **AECbytes**. Oct.2008.

1 Felipe Tavares da Silva

Engenheiro Civil. Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba. Professor Associado na Universidade Federal da Paraíba. Endereço postal: Cidade Universitária, sn, João Pessoa, PB, Brasil, 58000-000

2 Maria Gabriela Caffarena Celani

Arquiteta Urbanista. Doutorado em Architecture: Design & Computation no Massachusetts Institute of Technology. Professora Titular na Universidade Estadual de Campinas. Endereço postal: Cidade Universitária Zeferino Vaz, Barão Geraldo, Campinas, SP, Brasil, 13083-970

3 Erica de Sousa Checcucci

Arquiteta Urbanista. Doutorado em Difusão do Conhecimento pela Universidade Federal da Bahia. Professora Adjunta na Universidade Federal da Bahia. Endereço postal: Rua Caetano Moura, 121, Salvador, BA, Brasil, 40210-905