

PAVILHÃO COLMEIA: ESTUDO EXPLORATÓRIO SOBRE CYBER- PHYSICAL SYSTEMS NA GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA¹

HONEYCOMB PAVILION: EXPLORATORY STUDY ON CYBER- PHYSICAL SYSTEMS AT UNDERGRADUATE ARCHITECTURE²

*Juarez Moara Santos Franco*³

*Murilo Vieira Feliciano*⁴

*Freddy Júnior de Andrade Nemetala Guimarães*⁵

*Felipe Tostes Barreto*⁶

Resumo: Este artigo reporta uma experiência de uso de técnicas usuais de pesquisa em Engenharia Civil na prática de projetos de Arquitetura, em nível de Graduação, como (i) modelagem paramétrica com linguagem Python, (ii) fabricação digital; (iii) análise numérico-computacional via Método dos Elementos Finitos e (iv) análise experimental. Integradas ao projeto de Arquitetura, estas técnicas se aproximam conceitualmente do que a literatura recente define como *Cyber-Physical Systems* (CPS).

Palavras-chave: Estruturas Espaciais; Modelagem Paramétrica; Manufatura Digital; Análise numérica; *Cyber-Physical Systems*

Abstract: This article reports a undergraduate experiment, addressed to integrate usual Civil Engineering research techniques on Architectural design. These techniques include (i) parametric modeling in Python programming language, (ii) digital fabrication; (iii) numerical-computational analysis via the Finite Element Method and (iv) experimental analysis aided by destructive testing of the proposed structural system. Recent literature defines this integration on Architecture, Engineering and Manufacturing as *Cyber-Physical Systems* (CPS). This paper reports an exploratory research on this field.

Keywords: Spatial Structures; Parametric Modeling; Digital Manufacturing; Numerical analysis; *Cyber-Physical Systems*.

¹ Este artigo foi selecionado, dentre aqueles apresentados no Graphica 2022 – XIV International Conference on Graphics Engineering for Arts and Design – para ter sua versão original (FRANCO et al, 2023) ampliada e publicada neste periódico.

² This article was selected, from Graphica 2022 – XIV International Conference on Graphics Engineering for Arts and Design – to be expanded and published in this journal (FRANCO et al, 2023).

³ Dep. Arquitetura e Urbanismo da UFRRJ, juarezfranco@ufrj.br

⁴ Dep. Arquitetura e Urbanismo da UFRRJ, murilofeliciano@ufrj.br

⁵ Dep. Arquitetura e Urbanismo da UFRRJ, freddy@ufrj.br

⁶ Dep. Arquitetura e Urbanismo da UFRRJ, felipetostes@ufrj.br

1 Introdução

Este artigo apresenta o Pavilhão Colmeia, um projeto de estrutura reticulada espacial, desenvolvido inicialmente como atividade de extensão em Arquitetura na UFRRJ, voltada para a divulgação de técnicas de modelagem paramétrica em Python na plataforma Rhinoceros/Grasshopper[®]. Posteriormente, foram desenvolvidos e implementados (i) algoritmos para gerar a documentação deste sistema reticulado para fabricação por Controle Numérico por Computador (CNC) via dispositivo de corte a laser e (ii) análise numérico-computacional via Método dos Elementos Finitos (MEF) para simulação dos esforços internos, deslocamentos e estabilidade global elástica. A fabricação do modelo, ainda em escala reduzida, ensejou a realização de um ensaio destrutivo que revelou mecanismos de colapso não-evidentes no modelo de simulação estrutural numérico-computacional. Esses resultados, até certo ponto surpreendentes, demandaram estudos numérico-computacionais e experimentais mais precisos, com o objetivo de aprimorar o desempenho mecânico do sistema estrutural proposto. O fluxo bidirecional entre dados do mundo físico e de suas representações computacionais, visando o aprimoramento do desempenho dos produtos, é o núcleo da definição de Cyber-Physical Systems (CPS), um dos fundamentos tecnológicos da Quarta Revolução Industrial. O presente estudo se justifica como parte dos esforços para disseminar estes conceitos em nível de graduação entre os estudantes da Baixada Fluminense do Rio de Janeiro.

Este artigo está estruturado em três partes. Na revisão bibliográfica, estão apresentados os alguns conceitos relacionados à Quarta Revolução Industrial (4RI) e seus fundamentos tecnológicos, como os CPS. Estão inclusos, nessa revisão, as dificuldades usualmente identificadas pela literatura para a implementação da 4RI no setor da Construção Civil. Ainda nela, são apresentados alguns conceitos básicos sobre projeto de estruturas reticuladas do tipo Gridshell, que é tema do estudo de caso deste artigo. Na segunda parte, é apresentado o Pavilhão Colmeia. Como se trata de um estudo exploratório, os protocolos desta metodologia ainda estão em construção e poderão ser revistos em trabalhos posteriores. A terceira e última parte discute os resultados e aponta os próximos desdobramentos deste trabalho.

2 Revisão da literatura

2.1 Cyber-Physical Systems e a Quarta Revolução Industrial

Um dos maiores desafios do ensino de Arquitetura, do ponto de vista didático e pedagógico, é a caracterização do contexto tecnológico onde os profissionais irão

atuar no futuro. Segundo a Confederação Nacional das Indústrias, o conhecimento da indústria brasileira sobre tecnologias digitais e a sua incorporação à produção, pré-condições para o avanço da Indústria 4.0, ainda é pouco difundido: 42% das empresas desconhecem a importância das tecnologias digitais para a competitividade da indústria e mais da metade delas (52%) não utilizam nenhuma das dez opções mais relevantes de tecnologia digital (CNI, 2016). Há uma relativa escassez de dados sobre este tema quando o foco é o setor da construção civil no Brasil, onde o processo de produção ainda apresenta características artesanais ou semiartesanal típicas dos primórdios da primeira revolução industrial.

A literatura oriunda dos polos avançados de pesquisa em Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) sugere, desde o final do século XX, uma rápida transformação de linguagens construtivas, pautadas na automação, ganhos de desempenho e uma relativa liberdade geométrica, que ainda não se refletiu na prática profissional e na produção do espaço construído no Brasil. Isto torna incerta a escolha do cenário para o qual os futuros arquitetos brasileiros devem ser formados.

De maneira sucinta, e embora não haja consenso absoluto na literatura, são reconhecidos quatro grandes momentos da história da indústria: (i) a primeira revolução industrial, marcada pela substituição da energia humana e animal por outras fontes de energia mecânica; (ii) a segunda revolução industrial, pautada pela incorporação da energia elétrica; (iii) a terceira revolução industrial, viabilizada pelo advento da eletrônica; e (iv) a quarta revolução industrial, pautada em Cyber-Physical Systems (CPS).

Um CPS é todo sistema composto por partes automatizadas que permitem algum nível de conexão bidirecional entre o mundo físico e infraestruturas de comunicação e computação (JAZDI, 2014; AKANMU, 2021). É constituído por uma unidade de controle, geralmente formada por um ou mais microcontroladores, que fazem a mediação entre o funcionamento integrado de sensores e atuadores no mundo físico. O aspecto central desse modelo é a capacidade de intercâmbio de dados entre seus componentes. Os CPS designam um conjunto de ferramentas que já estavam disponíveis na segunda metade do século XX, porém só foram integrados nos últimos 20 anos.

Os CPS são pautados na sistematização de um conjunto de ferramentas:

- Em AEC, a estrutura de dados padrão para modelagem computacional é o Building Information Modeling (BIM), representação numérica capaz de prever alguns comportamentos de produtos, antes mesmo de sua fabricação;

- Internet of Things (IoT), que são dispositivos móveis capazes de enviar e receber dados via comunicação sem fio, conectados a sensores e atuadores que trabalham em tempo real. Os sistemas BIM, atualmente, apresentam algum nível de interoperabilidade entre sensores e atuadores através de API de algumas ferramentas, a exemplo do Revit DB link (YOU, 2020). Estas ferramentas ainda têm aplicações limitadas, porque uma vez que o modelo computacional seja modificado, os vínculos com os sensores e atuadores precisam ser refeitos manualmente;
- Computação em nuvem, que permite que dados adquiridos em campo sejam processados por computadores de grande porte e instruções sejam recebidas em tempo real pelos dispositivos móveis. Isto é necessário porque os dispositivos IoT, em geral, tem baixa capacidade de processamento. Na prática, IoT age como uma camada intermediária entre o mundo físico e sua representação computacional;
- Big data, que não trata, necessariamente, de gigantescos volumes de dados, mas das técnicas para extrair informação não evidente destes dados;
- Machine learning, que é um ramo da inteligência artificial com base matemática em probabilidade e estatística e que está intrinsecamente relacionada ao item anterior;
- Inteligência computacional, um ramo da ciência da computação, que procura contornar algumas das limitações dos algoritmos usuais de otimização. As técnicas de otimização em geral adotadas em problemas de AEC apresentam um domínio de variáveis relativamente pequeno e, portanto, oferecem soluções ótimas para partes isoladas dos problemas envolvidos na construção de um edifício. Reunir todas as variáveis de um problema deste tipo em um único algoritmo tradicional de otimização seria extremamente trabalhoso e resultaria em custos computacionais proibitivos. A inteligência computacional, ao menos em princípio, propõe-se a simular os padrões humanos de resposta em problemas cuja complexidade extrapola a capacidade dos algoritmos de otimização. A maioria dessas estratégias, no entanto, apresenta algum tipo de limitação técnica que requer experiência do programador ou do usuário para ser contornadas;
- A lógica fuzzy e suas variantes têm uma aplicação complementar às técnicas de machine learning. Durante um certo período da evolução das

pesquisas em ciência da computação, foram realizadas tentativas de desenvolver sistemas especialistas que, baseados em um conjunto finito de regras, seriam capazes de oferecer desempenho similar ou superior ao de um profissional humano. Observou-se que os sistemas especialistas só alcançavam estas expectativas na realização de tarefas relativamente simples. Em problemas reais da indústria, onde o número de situações imprevisíveis é elevado, essa estratégia mostrou-se inadequada. A lógica fuzzy, por outro lado, é própria para tomada de decisões em cenários de incerteza. Já não se trata de uma hipotética solução ótima, mas de proposições de alternativas viáveis, dado um conjunto de informações incompleto e passível de atualização.

Nos setores mais avançados da economia, onde já se alcançou uma relativa integração entre essas ferramentas, a Indústria 4.0 observou a emergência de (i) redes de trabalho inteligentes, pautadas em sistemas e equipamentos automatizados com cadeias de suprimento de alto desempenho mantidas graças à disponibilidade de sensores atuadores e redes de comunicação sem fio; (ii) mobilidade dos dispositivos de apoio, sejam sensores ou atuadores; e (iii) integração aos clientes, onde o conceito de produção em série é substituído pela oferta de produtos sob medida para a necessidade dos consumidores (JAZDI, 2014).

Em AEC, o conceito correlato à integração aos clientes é a Customização de Massa. A automação da construção e a customização, para alguns autores, se tornará uma necessidade mais evidente em breve, devido à expansão acelerada da demanda populacional. De acordo com a ONU, a população global levou 12 anos para crescer de sete para os atuais oito bilhões, mas chegará a nove bilhões em cerca de 15 anos, em 2037 (<https://news.un.org/pt/story/2022/11/1805342>, último acesso em 6 de fev. de 2023). Segundo José Pinto Duarte (Stuckeman Chair in Design Innovation pela Penn State), em sua palestra de abertura do congresso GRAPHICA 2022, não será possível atender a este rápido incremento de demanda, a menos que os fundamentos tecnológicos citados acima alcancem algum grau de maturidade em AEC.

2.2 Gridshells

Gridshell é um sistema estrutural espacial constituído por elementos de barra distribuídos ao longo de uma única superfície de dupla curvatura. São soluções de forte apelo visual, acompanhadas de desafios estruturais que exigem integração entre as equipes envolvidas no projeto. Existem, basicamente, duas variações de sistemas deste tipo, quando são considerados critérios estruturais e de fabricação e montagem.

A primeira variante é a gridshell flexível, ilustrada na Figura 1. O sistema é formado por elementos pré-tensionados durante o processo de fabricação e montagem que, em geral, oferecem relativa simplicidade de canteiro e projeto simplificado de ligações. Contudo, demandam análise não linear e hipótese de grandes deslocamentos, que constituem dificuldades adicionais de cálculo estrutural.

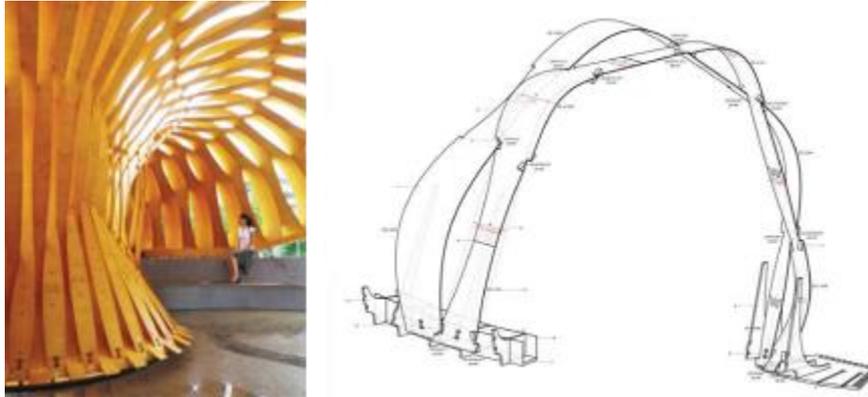


Figura 1 - Gridshell flexível (FLEISCHMANN, 2018)

A segunda variante é gridshell rígida (Figura 2), um sistema formado por elementos de barra e ligações sem qualquer tipo de pré-tensão, que exigem um número proporcionalmente maior de componentes, dificultam o projeto de ligações em projetos de formas mais livres e orgânicas, mas, de maneira geral, permitem cálculo estrutural em regime linear elástico com hipótese de pequenas deformações, consideravelmente mais simples do que os sistemas formados por elementos pré-tensionados.

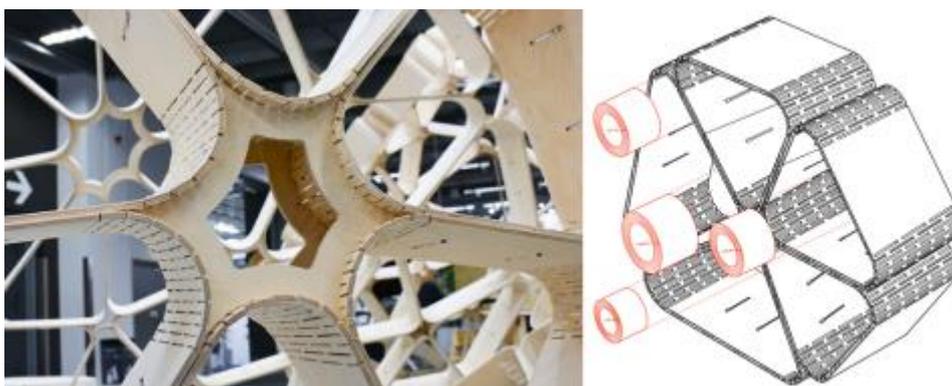


Figura 2 – Gridshell rígida (<https://emilpoulsen.com/2018/08/20/digital-wood-design-fabrication-of-a-full-scale-exhibition-structure-in-plywood/>. Último acesso em 6 de fev. de 2023)

Estudos recentes (Figuras 3 e 4), com novos materiais compósitos e soluções geométricas que combinam elementos de barra não prismáticos com elementos de

casca, tornaram imprecisos os limites da classificação anterior (DAMBROSIO, 2019; BECHERT, 2021).

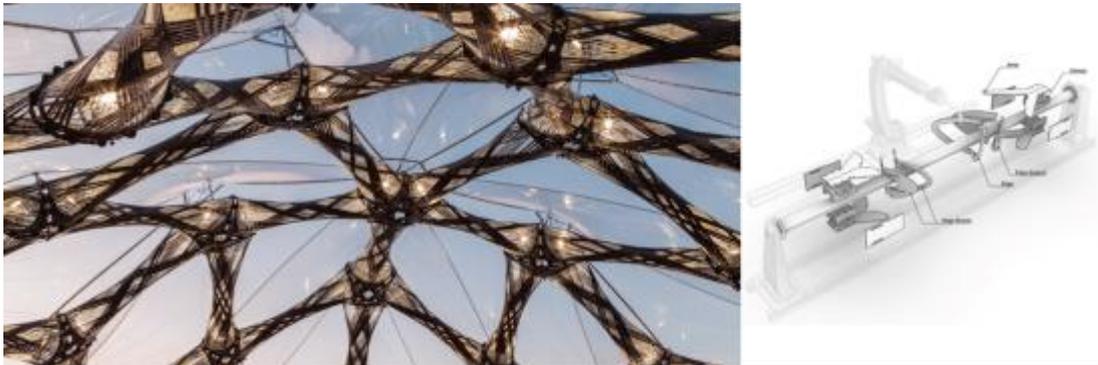


Figura 3 – Gridshell executado com materiais compósitos (DAMBROSIO, 2019)



Figura 4 – Gridshell que combina elementos de barra não prismáticos e elementos de casca (BECHERT, 2021)

3 Estudo de Caso: Pavilhão Colmeia

No Brasil, os projetos de pequenos pavilhões com propósito didático em Arquitetura são realizados há mais de uma década, graças à iniciativa de laboratórios importantes e reconhecidos nacionalmente, como o LAPAC (UNICAMP) e o LAMO (UFRJ), mas ainda não se generalizaram como método didático-pedagógico fora destes centros de pesquisa mais destacados. Este artigo relata os desafios, alguns resultados alcançados nesta primeira tentativa do gênero no laboratório de Lógica Computacional e Fabricação Digital, LOGIFAB (UFRRJ), bem como seus próximos desdobramentos.

O Pavilhão Colmeia é um sistema do tipo gridshell rígido, formado por uma malha de elementos de barra cujo eixo de maior momento de inércia é tangente à superfície média da estrutura. As ligações são rígidas e as células formadas por barras e ligações formam padrões geométricos hexagonais ou pentagonais que, no conjunto, remetem poeticamente à geometria de uma colmeia. Todos os componentes foram

projetados e executados em placas de MDF de 3mm de espessura, graças ao dispositivo de corte a laser disponível no LOGIFAB. Tanto os elementos de barra quanto as ligações foram calculadas para suportar os esforços axiais e momentos fletores, e o domo foi projetado para resistir à flambagem global do sistema, análogo a uma casca. Até onde sabemos, trata-se de um dos primeiros estudos em âmbito nacional que se propõe a sistematizar protocolos de fluxo bidirecional de dados entre modelos físicos e numérico-computacionais (CPS) em projetos de estruturas espaciais, ao menos no âmbito de graduação em Arquitetura.



Figura 5 – Pavilhão Colmeia, projeto dos autores em 2021

3.1 Conceito arquitetônico

O Pavilhão Colmeia proposto neste estudo é um exemplo de concepção estrutural biomimética. A mimética é um conceito antigo da teoria da Arte, com registros em Platão e Aristóteles, e provavelmente remonta a períodos anteriores. Assim como na música, onde algumas combinações de sons podem induzir certos estados de espírito, a proporção entre as partes de uma edificação teria efeito semelhante na Arquitetura. Contudo, o entendimento das definições e dos objetivos da mimética variam na História e, contemporaneamente, é mais usual compreender biomimética em termos de semelhanças geométricas e comparação de desempenho entre objetos naturais e seus correspondentes artificiais. O conceito “colmeia” norteou o projeto de Arquitetura desde os primeiros passos deste exercício. A ideia reúne três princípios que foram considerados relevantes para a equipe que o desenvolveu: (i) a edificação como

produto de trabalho cooperativo, (ii) a analogia com o abrigo natural e coletivo e (iii) a referência a um padrão geométrico relativamente simples e com forte apelo a nossas memórias afetivas, como ilustrado na Figura 6.



Figura 6 – Colmeia de abelhas (<https://passthehoney.com/blogs/the-buzz/why-eating-pass-the-honey-honeycomb-is-good-for-bees>. Último acesso em 06 de fevereiro de 2023)

É comum encontrar, na literatura, referências à eficiência do padrão geométrico da colmeia de abelhas. Do ponto de vista construtivo, ele implica baixa taxa de consumo de material para o volume encerrado pelas paredes; do ponto de vista estrutural, destaca-se a elevada relação entre resistência do sistema e massa do material. A equipe envolvida no projeto esteve ciente, desde o princípio, que a analogia adotada é estritamente geométrica e que não seriam esperadas as mesmas taxas de eficiência construtiva e estrutural do Pavilhão Colmeia e seu equivalente na Natureza, por diversos motivos: (i) o MDF e a cera de abelha apresentam propriedades físicas distintas; (ii) a colmeia natural é um processo aditivo, mais semelhante à impressão 3D do que ao corte a laser de placas de MDF; e (iii) existem diferenças relevantes entre os tipos de apoios e de carregamentos, bem como da geometria do espaço limitado pelos alvéolos que, no Pavilhão Colmeia, é simplesmente um domo que concentra células hexagonais em sua periferia.

Do ponto de vista geométrico e arquitetônico, a analogia com a colmeia natural é um conceito consistente: o espaço foi concebido para abrigar um pequeno piquenique, e suas aberturas, também pequenas, induzem o usuário a um ligeiro movimento de inclinação da cabeça e tronco ao entrar e sair, como se fossem abelhas. O pavilhão, concebido como uma instalação provisória, tem caráter lúdico, a despeito da inovação tecnológica que sua modelagem computacional e fabricação digital representam para a instituição de ensino que o projetou.

3.2 Modelagem paramétrica

Do ponto de vista arquitetônico, o modelo computacional do Pavilhão Colmeia é uma coleção de instâncias de *breps*, uma classe que descreve geometrias tridimensionais em sistemas CAD. A modelagem paramétrica do Pavilhão Colmeia foi desenvolvida na plataforma Grasshopper/Rhinoceros, com parte de código implementado em linguagem Python. O modelo computacional integra modelagem geométrica, análise e otimização estrutural e documentação para fabricação digital, um conceito conhecido na literatura como *file-to-factory*. Como todo modelo paramétrico, a implementação computacional do Pavilhão Colmeia é um sistema generativo que assume um vetor de variáveis contínuas ou discretas como entrada, e um ou mais modelos como saída. Nesta proposta inicial, há três modelos computacionais de saída: (i) modelo tridimensional de Arquitetura; (ii) modelo tridimensional de estrutura, para simulação inicial de desempenho; e (iii) modelo bidimensional de fabricação, com o desenho e o código que identifica cada componente durante a fabricação e montagem do sistema. Cada um desses modelos tem suas próprias regras de geração, relacionadas às diferentes estruturas de dados das tecnologias Computer-Aided Design (CAD), Computer-Aided Engineering (CAE) e Computer-Aided Manufacturing (CAM).

A modelagem paramétrica do pavilhão oferece controle sobre três tipos de variáveis geométricas: forma, dimensão e topologia. As variáveis de forma controlam as características geométricas mais gerais do domo circular, como seu raio e altura no meio do vão, e podem resultar em domos abatidos, semiesféricos ou ogivais. As variáveis de dimensão controlam largura e espessura dos elementos de barra, bem como detalhes nos elementos de ligação ilustrados na Figura 7. Algumas dimensões são tratadas como “variáveis dependentes” e calculadas automaticamente pelo sistema generativo, como o comprimento de cada elemento de barra ou os ângulos entre os suportes em cada ligação. A equipe desenvolveu a solução para a conexão, sem recorrer a estudos prévios da literatura, com o objetivo de propor uma ligação (i) apta a resistir a esforços axiais, de cisalhamento e de flexão; (ii) que fosse fabricável em MDF por sistema de corte a laser; e (iii) que pudesse ser implementada em um código na linguagem Python, capaz de reconhecer a topologia, a forma e as dimensões do sistema de barras e adaptar as ligações a cada caso particular.

O sistema completo é formado por apenas três elementos: barra, ligação e travamento. As variáveis topológicas controlam as relações de adjacência entre esses três elementos, de modo a expressar o padrão geométrico e a densidade da malha de células do reticulado na superfície do Pavilhão Colmeia.

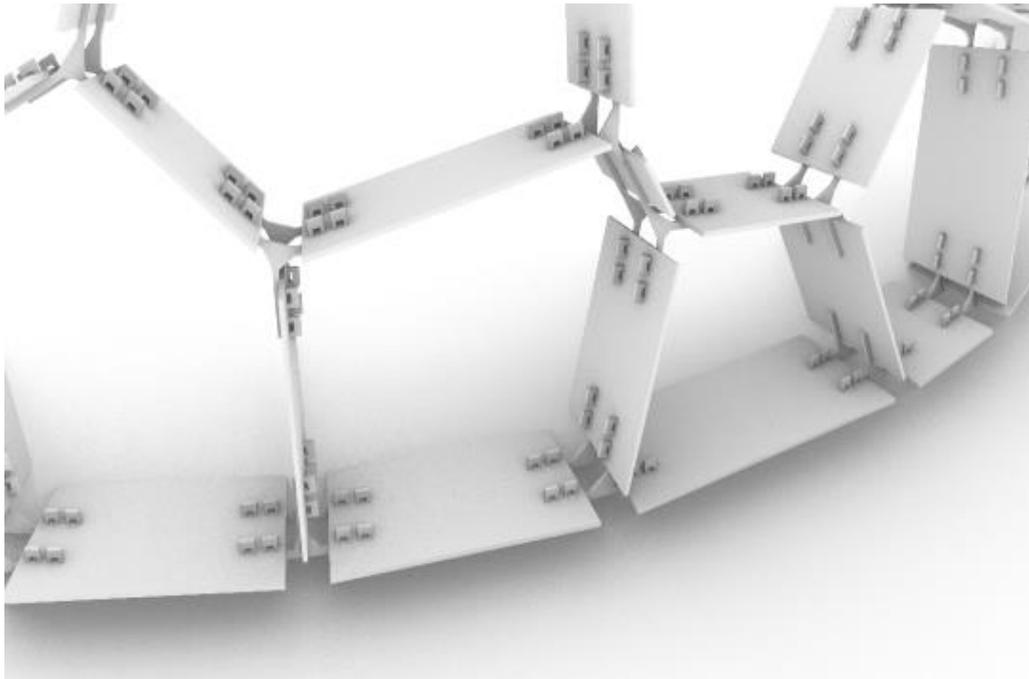


Figura 7 – Elementos de barra e de ligação únicos e gerados por algoritmos

A Figura 8 apresenta algumas possíveis variações de topologia que poderiam ter sido fabricadas. Três destes exemplos (Fig. 8a, 8b e 8e) são instâncias facilmente reconhecíveis do padrão Voronoi, enquanto os outros dois apresentam padrão regular retangular e hexagonal. Não é objetivo deste estudo ilustrar o conjunto potencialmente infinito de padrões que podem formar uma gridshell. A equipe envolvida estava focada em estabelecer um algoritmo que gerasse soluções suficientemente variadas para observar diferentes comportamentos estruturais na simulação computacional de desempenho estrutural e que sugerissem possíveis dificuldades de fabricação.

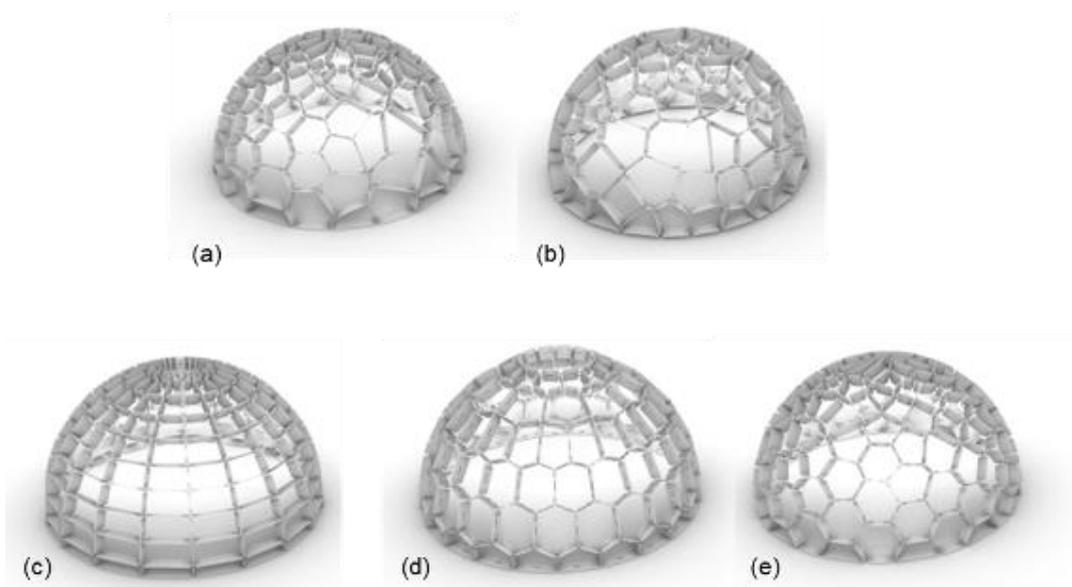


Figura 8 – Cinco topologias resultantes do sistema generativo proposto

O algoritmo proposto foi capaz de gerar tanto células regulares quanto irregulares a partir do padrão Voronoi, inclusive com algum nível de controle sobre a grau de aleatoriedade desejado no padrão. Esta generalidade confirma o Voronoi como um algoritmo versátil em termos biomiméticos, capaz de fazer alusão a uma vasta gama de padrões naturais.

3.3 Análise numérico-computacional

A estrutura de dados dos sistemas CAE impõe outros objetos e regras para o sistema generativo. Em sua representação mais simples, os elementos de barra são tratados por instâncias de linhas no eixo longitudinal que contém o centroide do perfil transversal destas barras, e as ligações entre elas são dadas por pontos nodais. As propriedades físicas e as geométricas das seções transversais, bem como as condições de apoios e carregamentos, são atribuídas por parâmetros numéricos. Neste estudo, o aplicativo Karamba3D® foi adotado como ferramenta para o cálculo numérico-computacional do Pavilhão Colmeia. Essa ferramenta é própria para análise estruturais simplificadas e tem sido adotada com bons resultados pelo LOGIFAB em atividades de pesquisa e extensão para graduação em Arquitetura. Entre as verificações básicas que este aplicativo oferece estão o controle de deslocamentos e de tensões, taxa de utilização e flambagem linear elástica do sistema reticulado.

A Figura 9 apresenta as distribuições de forças normais em cinco versões no Pavilhão Colmeia. A Figura 9b apresenta uma configuração Voronoi típica e não permite distinguir um padrão claro na distribuição dos esforços. As Figuras 9a e 9e apresentam algum tipo de transição entre malhas regulares e irregulares e, igualmente, não permitem distinguir um padrão claro na distribuição dos esforços. A Figura 9c apresenta um padrão previsível, onde as barras meridionais estão em compressão e, as demais, em tração. A Figura 9d, que adotamos no estudo de fabricação digital, apresenta um padrão semelhante ao da Figura 9c. Conclui-se que a distribuição destes esforços internos não é a mesma em diferentes configurações de topologia. Os resultados não apontaram, no entanto, uma superioridade indiscutível para o desempenho de qualquer um dos modelos apresentados.

A Figura 10 permite uma análise qualitativa da distribuição de tensões no modelo proposto, ainda que essencialmente imprecisa do ponto de vista quantitativo. Explicitamos esta imprecisão porque, até o momento destes ensaios, ainda não dispúnhamos de meios técnicos para determinar as propriedades físicas dos materiais empregados. A aquisição em laboratório destas propriedades físicas, indispensáveis

para uma análise estrutural cuidadosa, serão viabilizadas em próximas etapas desta pesquisa, graças a parcerias com outros laboratórios da UFRRJ.

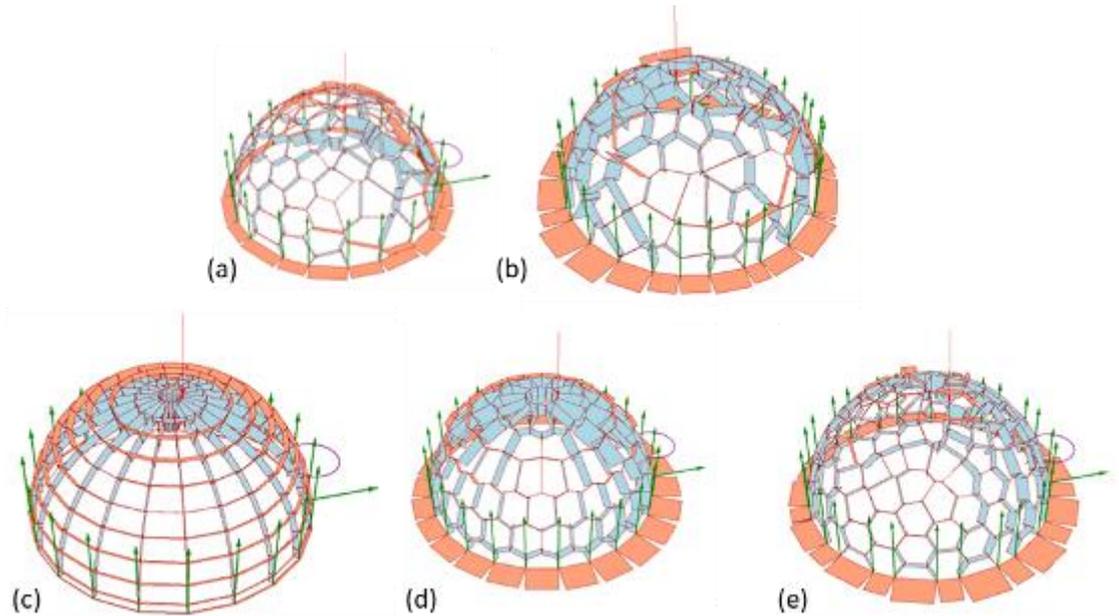


Figura 9 – Análise linear elástica com visualização de esforços internos

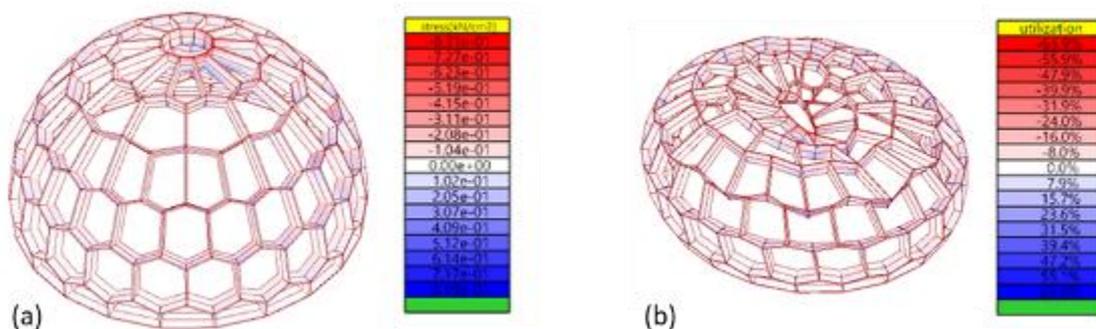


Figura 10 – (a) Tensões normais em configuração indeformada; (b) taxa de utilização em configuração deformada

Nas imagens 10a e 10b, as regiões em azul representam tensões normais de tração, as regiões em vermelho indicam compressão e as regiões em branco representam partes da estrutura que permanecem em repouso, mesmo após a ação de forças externas sobre o sistema. A análise qualitativa revelou dois fenômenos que se confirmaram no ensaio de ruptura apresentado, a seguir, neste artigo: (i) a presença de esforços de flexão, típicos deste padrão de distribuição de tensões e (ii) por razões que a equipe envolvida ainda não conseguiu esclarecer, as deformações do sistema são assimétricas, mesmo que a geometria e os carregamentos adotados neste exemplo sejam, ao menos em primeira vista, perfeitamente simétricos.

A Figura 11 exibe os três primeiros modos de flambagem global elástica para o modelo estrutural proposto. Nota-se uma clara tendência para modos de flambagem torcionais, especificamente onde ocorre uma transição entre padrões hexagonais e pentagonais no domo. No entanto, como a carga crítica de flambagem encontra-se em ordem de grandeza bem acima do carregamento previsto para colapso do sistema, a equipe decidiu manter este padrão para fabricação digital e ensaio destrutivo. Em estudos futuros, esta informação será relevante na avaliação de domos abatidos, onde os fenômenos de flambagem podem ser dominantes na avaliação da estrutura.

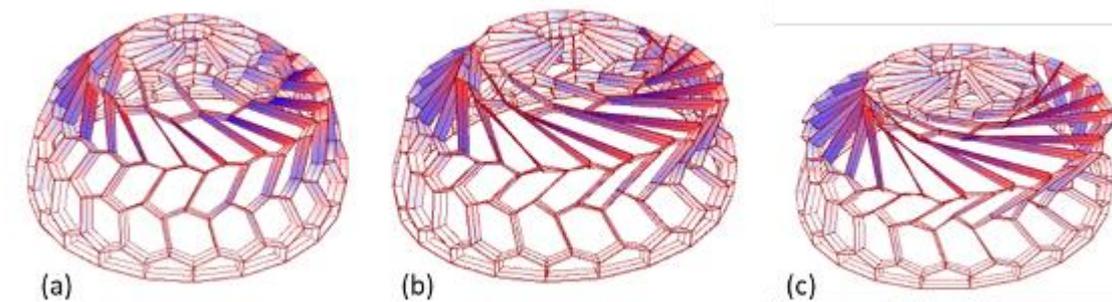


Figura 11 – Três primeiros modos de flambagem global elástica

3.4 Fabricação automática e montagem manual

Os algoritmos desenvolvidos neste trabalho permitem a automação da geração geométrica, da análise estrutural e do detalhamento automático de gridshells com malhas regulares ou sem padrão geométrico regular. O Pavilhão Colmeia foi concebido totalmente em MDF, para que fosse permitido fabricar cada um de seus componentes em um dispositivo de corte a laser, como apresentado na Figura 12.

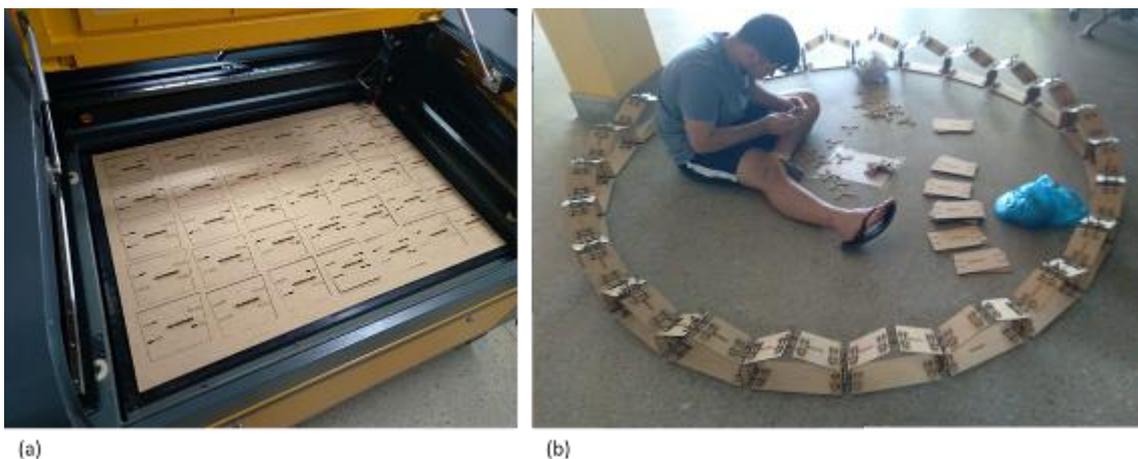


Figura 12 – (a) processos de fabricação e (b) montagem do Pavilhão Colmeia

A montagem do pavilhão foi realizada sem recorrer a parafusos, cola ou qualquer outro elemento que não fosse executado em MDF. Caso as “folgas” entre as peças fossem excessivas, a montagem manual seria simples, mas ligações perderiam rigidez e surgiria a possibilidade de acomodações súbitas contra forças externas, para as quais o sistema não teria sido dimensionado. Por outro lado, se a folga para os furos fosse demasiadamente pequena, a montagem destes componentes se tornaria muito difícil e lenta. Em nosso experimento, ainda não chegamos ao estabelecimento de uma tolerância dimensional que seja, simultaneamente, útil para a montagem e eficiente para a rigidez das ligações.

Para viabilizar a montagem do Pavilhão Colmeia, foi desenvolvido um algoritmo simples que identifica cada elemento de barra e cada elemento de ligação por um código. Com este recurso, é possível reconhecer, no canteiro, a relação de correspondência entre cada elemento de barra e suas ligações, e vice-versa, como ilustrado na Figura 13. Essa metodologia foi testada e se mostrou tecnicamente viável, no caso de sistemas estruturais formados por células regulares.

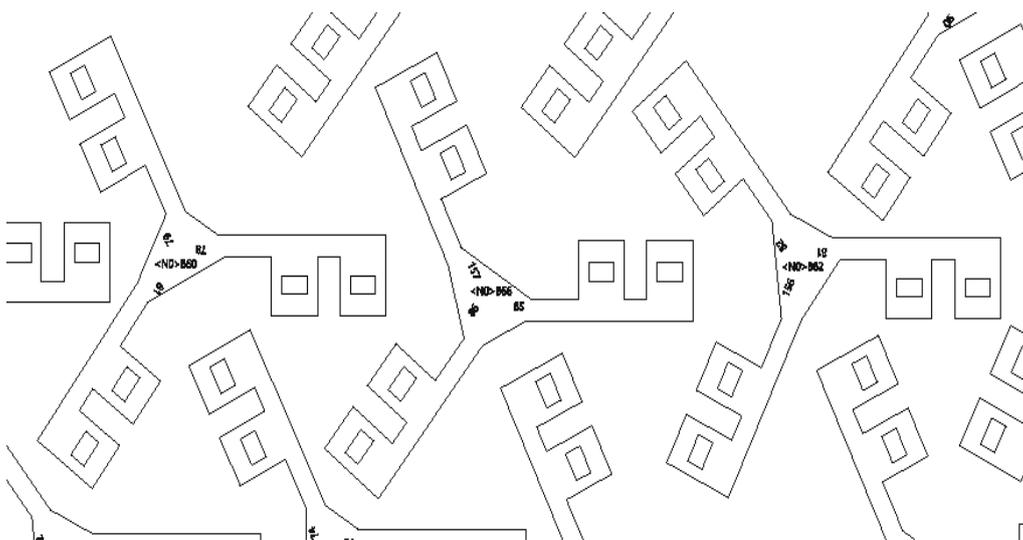


Figura 13 – Automação da geração geométrica e identificação dos elementos de ligação

A automação não atinge a fase de montagem, que foi realizada manualmente, como apresentado na Figura 14. A ausência de uma metodologia clara para a gestão de um canteiro produtivo, dado o desnível tecnológico entre as etapas de projeto/fabricação e montagem, representa um gargalo para a produção de estruturas com formas irregulares, ao menos para o nível de experiência disponível durante o experimento do Pavilhão Colmeia.



Figura 14 – Finalização da montagem e diferentes perspectivas do Pavilhão Colmeia

3.5 Ensaio Destrutivo

Após a conclusão da montagem do Pavilhão Colmeia, a equipe envolvida iniciou os preparativos para o ensaio destrutivo da pequena estrutura, de cerca de dois metros de diâmetro e um metro de altura. Um recipiente plástico foi suspenso por cabos de *nylon* presos a duas plataformas de espessura três vezes maior do que os componentes da estrutura. A placa superior apresentava um pequeno furo, por onde uma mangueira permitiu que fosse transferida água em pequenas doses para o interior do recipiente plástico, até que o sistema entrasse em colapso. Foram necessários apenas seis litros e meio de água (aproximadamente 65N) para levar à ruptura da estrutura.



Figura 15 – Preparação do ensaio destrutivo

Este tipo de ensaio é importante, porque modelos computacionais simplificados raramente são capazes de capturar o mecanismo de ruptura em sistemas físicos reais. De fato, a Figura 16 mostra que a ruptura ocorreu nas ligações, cujo comportamento não pode ser previsto nos modelos em Karamba3D, apresentados anteriormente nas Figuras 9, 10 e 11. A Figura 16 indica que o colapso ocorreu primeiro nas hastes comprimidas dos elementos de ligação, propagando-se, a seguir, para as hastes tracionadas. As ligações que falharam estavam na região de transição entre as células hexagonais e pentagonais, o que reforça a hipótese levantada anteriormente de que a combinação de células de padrões geométricos diferentes pode gerar zonas de fragilidade no sistema estrutural. Tal hipótese só poderá ser confirmada ou refutada através de mais experimentos.



Figura 16 – Identificação do colapso do sistema estrutural

3.6 Modelagem numérico-computacional das ligações

Até o momento, foi descrito um fluxo unidirecional de dados, que parte da modelagem computacional e paramétrica do Pavilhão Colmeia para a realização de um ensaio destrutivo no mundo físico. Nesta última seção, inicia-se um movimento em sentido contrário: a partir dos resultados do ensaio destrutivo, procura-se uma representação computacional que permita compreender melhor o seu mecanismo de colapso. O modelo apresentado a seguir foi realizado na versão educacional do Ansys Workbench®. As placas de MDF da barra e das ligações foram modeladas como elemento de casca com 3mm de espessura. Foi adotada a hipótese de que a ligação apresentava um apoio engastado. Todas as tolerâncias dimensionais do projeto de fabricação e montagem foram respeitadas no modelo, de modo que foi preciso modelar os “elementos de contato”, conforme ilustrado na Figura 17. Os

carregamentos foram aplicados sobre a seção transversal da barra, de modo que o modelo baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) efetua a transferência destes esforços para a ligação através dos elementos de contato.

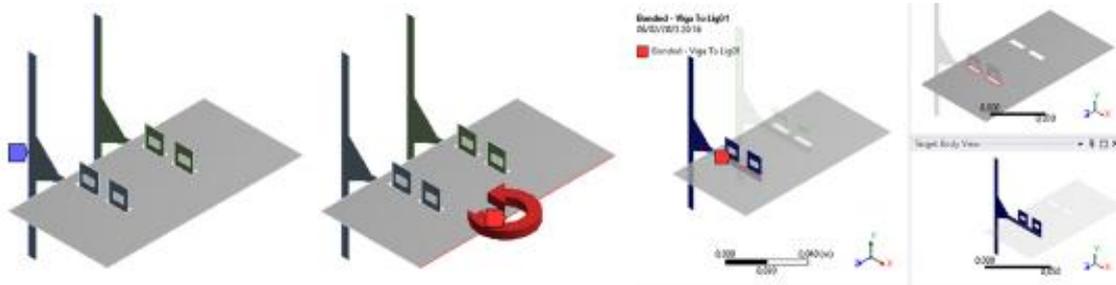


Figura 17 – Modelagem dos apoios, carregamentos e elementos de contato em Ansys Workbench®

As imagens da Figura 18 apresentam as tensões equivalentes de Von Mises para duas condições de carregamento sobre a barra: momento fletor em torno do eixo de maior inércia (M_x) e momento fletor em torno do eixo de menor inércia (M_y). Trata-se de uma análise qualitativa, uma vez que as propriedades físicas dos materiais ainda não foram avaliadas em laboratório.

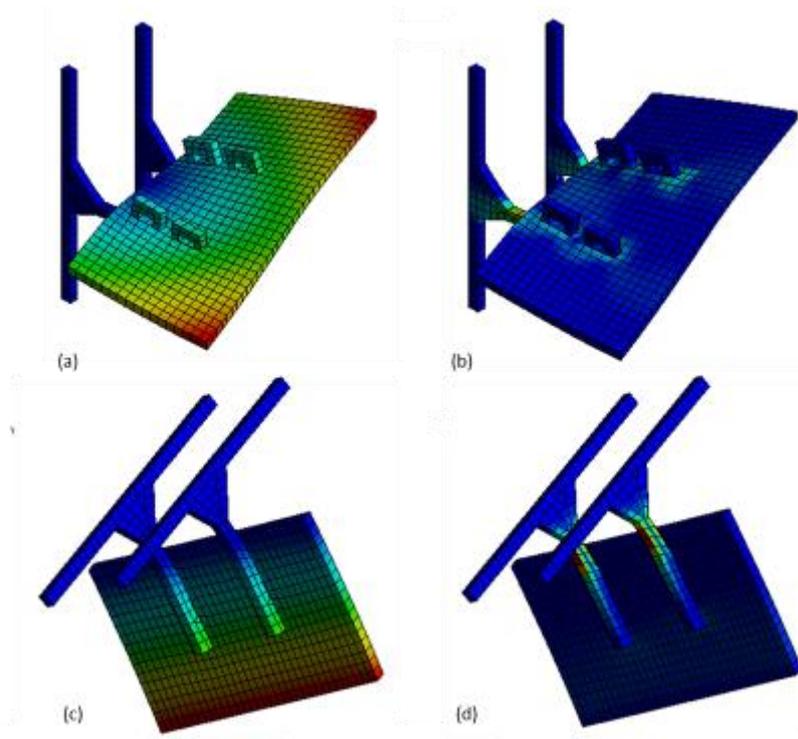


Figura 18 – Avaliação qualitativa das ligações pelo Método dos Elementos Finitos

As Figuras 18a e 18b apresentam os efeitos para o esforço M_x (deformação e distribuição das tensões equivalentes de Von Mises), enquanto as Figuras 18c e 18d

revelam estes mesmos efeitos para o esforço em My. As distribuições de tensões nessas imagens sugerem que a distribuição nas hastes dos elementos de ligação não é uniforme, havendo uma significativa concentração nas faces paralelas ao plano médio das barras e que são queimadas durante o processo de corte a laser. Ainda não temos dados suficientes para concluir que as imediações afetadas pela queima apresentam propriedades físicas diferentes das demais, nem se isto representa ganho ou perda de eficiência neste sistema.

4 Conclusão e desdobramentos futuros

Este trabalho apresenta uma experiência didática pioneira nos limites de nossa instituição de ensino. Sua principal proposta é oferecer aos estudantes de Arquitetura uma visão inicial de Cyber-Physical Systems, através de uma abordagem integrada entre modelagem paramétrica, projeto de estruturas, fabricação digital, montagem e ensaio destrutivo de um sistema estrutural de pequeno porte executado em MDF. Há dois pontos de investigação ainda não esclarecidos e que merecem ser pesquisados: (i) a quantificação da relação entre tolerância dimensional e a rigidez das ligações nesta gridshell; e (ii) a proposição de métodos de aquisição de dados em ensaios destrutivos por incremento de carga via extensômetros em tecnologia Arduino. Um dos objetivos mais amplo deste estudo é estabelecer protocolos de pesquisa baseados nos princípios de CPS, visando o amadurecimento do presente debate, em âmbito acadêmico no Brasil.

Uma de nossas principais dificuldades encontradas neste trabalho foi a ausência de informações sobre as propriedades físicas do MDF adotado, pois o LOGIFAB não dispõe de recursos para estes testes. O código do sistema generativo, desenvolvido em Python, ainda passará por aprimoramentos, para que ele contemple o “adoçamento” das arestas das ligações. Ainda que um estudo mais aprofundado deste fator de concentração de tensões esteja além das possibilidades de nosso laboratório, uma estratégia para contornar tal dificuldade é que se firmem parcerias para desenvolver estudos neste sentido.

A observação dos mecanismos de colapso permitiu identificar pontos fracos do sistema, e a construção de um segundo modelo, com características aprimoradas, está em andamento. Dessa forma, um dos principais objetivos futuros da presente pesquisa é verificar a possibilidade de inferir, a partir de ensaios com modelos reduzidos de diversas escalas, qual será o comportamento estrutural em modelos maiores do que aqueles que a tecnologia de fabricação por corte a laser de pequenas placas pode oferecer.

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ, pelo suporte financeiro que permitiu a implementação do Laboratório de Logica Computacional e Fabricação Digital - LOGIFAB e pela concessão de bolsas de Iniciação Científica e Iniciação Tecnológica aos estudantes de graduação que atuam neste laboratório.

Referências

ADRIAENSSENS, S., BLOCK, P., VEENENDAAL, D.; WILLIAMS, C. **Shell Structures for Architecture**. Taylor and Francis, 2014

AKANMU A. A.; ANUMBA C.J.; OGUNSEIJU O.O. **Towards next generation cyber-physical systems and digital twins for construction**. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), Special issue: 'Next Generation ICT - How distant is ubiquitous computing?', Vol. 26, pg. 505-525, DOI: 10.36680/j.itcon.2021.027, 2021

BECHERT S.; SONNTAG D.; ALDINGER L.; KNIPPERS J. **Integrative structural design and engineering methods for segmented timber shells - BUGA Wood Pavilion**. Structures 34 (2021) 4814–4833.

CHILTON, J, at. al. **Timber Gridshells: architecture, structure and craft**. Routledge, 2016.

COLOMBO A.W; KARNOUSKOS S.; HANISCH C. **Engineering human-focused Industrial Cyber-Physical Systems in Industry 4.0 context**. Phil. Trans. R. Soc. A 379: 20200366. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0366>, 2021.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA: **Desafios para a indústria 4.0 no Brasil** / Confederação Nacional da Indústria. – Brasília: CNI, 2016

DAMBROSIO N.; ZECHMEISTER C.; BODEA S.; KOSLOWSKI V.; GIL-PÉREZ M.; RONGEN B.; KNIPPERS J.; MENGES A. **Buga Fibre Pavilion, Towards an architectural application of novel fiber composite building systems**. Acadia, 2019.

FRANCO, J. M. S; FELICIANO, M. V; GUIMARÃES, F. J. A. N. Pavilhão Colméia: um estudo de integração entre modelagem paramétrica, análise estrutural e fabricação digital em Arquitetura. In: Graphica 2022 - XIV International Conference on Graphics Engineering for Arts and Design, Seropédica. **Anais Graphica 2022: ...** Recife: Even, 2023.

FLEISCHMANN M.; LIENHARD J.; MENGES A. **Computational Design Synthesis. Embedding Material Behaviour in Generative Computational Processes**. eCAADe 29, 2011.

FLEISCHMANN M.; KNIPPERS J.; LIENHARD J.; MENGES A.; SCHLEICHER S.. **Material Behaviour. Embedding Physical Properties in Computational Design Processes**. Report from ICD/ITKE University of Stuttgart, 2018

SANTOS, C. O uso de cores. In: Graphica 2022 - XIV International Conference on Graphics Engineering for Arts and Design, Seropédica. **Anais Graphica 2022: ...** Recife: Even, 2023.

HARRISON R.; VERA D.; AHMAD B. **Towards the realization of dynamically adaptable manufacturing automation systems.** Phil. Trans. R. Soc. A 379: 20200365, 2021. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0365>,

HENRIQUES, G. C; FRANCO, J. M. **Gridshells: integrating design with structural performance in early design stages, using formal and informal knowledge.** Gestão & Tecnologia de Projetos. São Paulo, v 17, n 1, 2022.

HENRIQUES, G. C; FRANCO, J. M. **Gridshells: integrating design with structural performance: formal and informal form finding.** Sigradi 2020: Transformative design, 2020.

JAZDI N. **Cyber Physical Systems in the Context of Industry 4.0.** Report from Institute of Industrial Automation and Software Engineering, 2014.

LINARES, D.A.; ANUMBA, C.; ROOFIGARI-ESFAHAN, N.. **Overview of Supporting Technologies for Cyber-Physical Systems Implementation in the AEC Industry.** Computing in Civil Engineering, 2019.

PELOUX, L. **The Design of Elastic Gridshell.** Paris-Est, 2018.

ROCKWOOD, D. **Bamboo Gridshells.** Routledge, 2015

SIMÃO A.S.; SILVA A.D.; MENEZES C.A.G.. **Impactos da Indústria 4.0 na Construção Civil Brasileira.** VX SEGeT: Indústria 4.0 e o uso de tecnologias digitais, 2008.

YOU Z.; FENG L.: **Integration of Industry 4.0 Related Technologies in Construction Industry: A Framework of Cyber-Physical System.** IEEE access, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2020.3007206, 2020.

YUAN, P. F; CHAI, H; JIN, J. **Digital form-finding and fabrication of strained gridshells with complex geometries.** Tongji University, 2018