

A concepção paramétrica de estruturas sólidas celulares para projetos de arquitetura

Edital:	Edital Piiic 2020/2021
Grande Área do Conhecimento (CNPq):	Ciências Sociais Aplicadas
Área do Conhecimento (CNPq):	Arquitetura e Urbanismo
Título do Projeto:	Ecologias de Projeto
Título do Subprojeto:	A concepção paramétrica de estruturas sólidas celulares para projetos de arquitetura
Professor Orientador:	Prof. Dr. Bruno Massara Rocha
Estudante:	Flávia Felipe Cury Soares

Resumo

O conceito ecologias de projeto trata da aplicação do conceito central da ecologia no contexto da arquitetura e projetos paramétricos. Dessa forma, os sólidos celulares são determinantes no tópico analisado, por se tratarem de estruturas caracterizadas por uma composição morfológica complexa, reticulada e porosa, podendo ter origens em ambientes naturais ou serem fabricadas artificialmente pelo humano. Para garantir o entendimento do funcionamento desses sólidos, o estudo através da metodologia de Design Science Research foi necessário, com a construção da pesquisa bibliográfica com foco em sistemas estruturais paramétricos leves e de alta performance no âmbito da arquitetura, engenharia e design. O desenvolvimento de códigos em diagrid através do Workshop de Modelagem Generativa e plug-ins como Weaverbird, Mesh e Parakeet, permitiu a impressão 3D do modelo criado no Grasshopper e Rhinoceros. O protótipo serviu como base para o entendimento da estrutura e como ela se comportaria se construída em escala real.

Palavras-chave: Sólidos celulares. Parametrização. Impressão 3D. Grasshopper.

1 Introdução

Os sólidos celulares são tratados aqui como parte de uma abordagem intitulada ecologias de projeto (Rocha, Bolssoni, Bussolotti, 2019) que trata da aplicação do conceito central da ecologia, a ciência das relações, no contexto da arquitetura, em especial, na relação entre os projetos paramétricos e a fabricação digital na produção de soluções leves, de baixo desperdício e resistentes. Nesse sentido, os sólidos celulares apresentados aqui são protótipos de morfologias estruturais reticuladas desenvolvidas no Grasshopper e impressas em 3D que objetivam assegurar maior economia, resistência e adaptabilidade para elementos e espaços arquitetônicos. Eles são apresentados aqui ainda como inteligências de projeto paramétrico que exploram a otimização no uso da impressão 3d na produção sem suporte de estruturas de baixa densidade relativa e de topologia anisotrópica (Rocha, et al, 2020) mas tendo como horizonte sua produção futura em escala arquitetônica.

A produção de estruturas sólidas celulares com o uso de impressão 3d vem se revelando bastante promissora em função do potencial inerente da fabricação digital em gerar morfologias não lineares customizadas em massa. A impressão 3D permite não apenas gerar morfologias celulares complexas por adição de camadas, como também

viabiliza sua adaptação para inúmeras outras versões ou aplicações em um processo de baixíssima perda de material.

2 Objetivos

Os objetivos do estudo foram realizar uma pesquisa bibliográfica com foco em sistemas estruturais paramétricos leves e de alta performance no âmbito da arquitetura, engenharia e design; aprofundar e aprimorar os códigos de computador que dão suporte à modelagem de sólidos ou superfícies de base celular; identificar plugins para a plataforma Grasshopper capazes de gerar morfologias de sólidos celulares em modelos tridimensionais para poder conceber novas formas. Além disso, outros objetivos da pesquisa foram produzir protótipos em escala reduzida utilizando a impressão 3d; analisar projetos de arquitetura que aplicam os sólidos celulares como sistema estrutural fundamental; fazer uma análise detalhada da aplicação dos materiais celulares no contexto da engenharia, arquitetura e design, avaliando e registrando os resultados; e, finalmente, publicar as análises e as conclusões em anais de congressos especializados.

3 Embasamento Teórico

Os sólidos celulares são estruturas caracterizadas por uma composição morfológica complexa, reticulada e porosa, podendo ter origens em ambientes naturais ou serem fabricadas artificialmente pelo humano. No contexto artificial, podem ser definidas como metamateriais (Jose, 2015), ou seja, materiais-de-base com composições geométricas interiores específicas para atender a uma dada finalidade. Dentre elas, temos o isolamento térmico e acústico, absorção mecânica, fluabilidade, impermeabilidade, com aplicações arquitetônicas em materiais de revestimentos, acabamentos. As qualidades mais importantes derivadas de sua complexa morfologia são: a baixa densidade relativa (porosidade) e a topologia (arquitetura celular: isotrópicos ou anisotrópicos) (Gibson, Ashby, 1999), (Ajdari, 2008), (Bhate, 2019), (Erjavec, 2011), (Schaedler, Carter, 2016).

Um exemplo é o Shenzhen Bay Sport Center feito por Axs Satow, como evidenciado no Anexo A. Este projeto está localizado na cidade de Shenzhen, China e foi realizado em 2011. É composto por um estádio multiuso e um ginásio.

Ao se discutir sobre Additive Manufacturing, mais conhecida como impressão 3D, é importante definir que a esta se refere como um grupo de tecnologias que utiliza uma abordagem camada por camada para criar objetos de forma livre, da base para o topo. Esta forma de construção permite a criação de uma hierarquia feita para aplicações específicas (Schaedler, Carter, 2016). Os materiais utilizados são diversos, além das diferentes técnicas de deposição de matéria. A técnica permite a fabricação de objetos que seriam impossíveis de serem criados através das formas convencionais de produção.

O processo de impressão 3D por deposição de filamentos fundidos (Fused Deposition Modeling - FDM) associado à modelagem paramétrica apresenta como principais potencialidades: a) a customização em massa das peças produzidas sem prejuízos no tempo de impressão ou na reconfiguração; b) o desperdício zero de material desde que realizados projetos sem necessidade de suportes de impressão; c) o acesso a uma ampla rede de informações técnicas gratuitas disponibilizadas por pesquisadores e desenvolvedores (Rocha, et al, 2020).

Este processo pode ser observado no Anexo A, que mostra dois protótipos realizados no Workshop de Modelagem Generativa em 2020. É possível observar a deposição do material pelo método camada por camada e a evolução da forma com o avanço da máquina.

A parametrização pode ser caracterizada como o estabelecimento de parâmetros e seus valores na construção de uma forma geométrica, ou seja, um método de modelagem no qual cada elemento é flexível e capaz de ser computado (Tramontano, 2015), (Hanna, Turner, 2006). Este tipo de construção modifica o processo de projeto de forma que há uma automatização na alteração dos valores utilizados, a fim de fornecer, em tempo real, a visualização da modificação no objeto. Ademais, é necessária uma especificação maior das características do elemento no momento de sua construção, já que a forma é o resultado desse procedimento.

Um exemplo é a obra Huanglong Waterfront Bamboo Pavilion, observada no Anexo A, realizada pelo Atelier cnS, juntamente com a School of Architecture, South China University of Technology em 2020. Este projeto está localizado na Vila de Huanglong, na China, e adota um método cantilever de dois lados, utilizando a dureza dos bambus originais para realizar uma integração de estrutura e fachada. O Huanglong Waterfront Bamboo Pavilion é multifuncional, integrando espaço de lazer, teatro aquático e cais em um.

A constante necessidade de diminuição de resíduos gerados em construções, além da extração de recursos, impulsiona a transformação dos métodos de construção e a busca pela utilização de um design ecológico (sustentável) (Naboni, Kunic, 2017). A impressão 3D interfere na sustentabilidade tanto na seleção de materiais quanto no sistema construtivo. Isso se verifica na diminuição de custos de produção, comparados aos meios tradicionais, inclusive no transporte da matéria e armazenamento. Ademais, o número de acidentes no local da obra é reduzido, além da diminuição do desperdício de material. Por último, o tempo utilizado para a construção em 3D é consideravelmente encurtado. Dessa forma, a impressão 3D possui grande potencial na área sustentável (Sakin, Kiroglu, 2017).

Um exemplo é a TECLA (Anexo A), uma casa reutilizável, reciclável e acessível, feita por MC A – Mario Cucinella Architects e WASP. Localizada em Bolonha, Itália e prevista para 2021, é produzida totalmente em argila, garantindo uma construção biodegradável. É possível também ajustar a casa para diferentes ambientes.

A etimologia do termo complexo tem relação com tessitura, do latim tessere/complexus. A geometria da arquitetura associada com a complexidade normalmente são formas cuja representação é uma rede, de linhas, pontos ou arestas bastante variáveis. No projeto de arquitetura contemporâneo o que interessa é usar a modelagem paramétrica como forma de controle e configuração de geometrias em rede, e com isso obter soluções mais leves, econômicas e sustentáveis, com diferentes materiais e técnicas (3D print).

A não-linearidade é uma característica dos projetos complexos, com comportamentos imprevisíveis e em constante transformação. Um exemplo disso é a obra Sandwaves (Anexo A), realizada em 2019 por Mamou-Mani e Studio Precht, em colaboração com Design Lab Experience. Esta é uma instalação modular urbana feita com areia e resina de furano, que se localiza em Riad, Arábia Saudita, e utiliza uma estrutura paramétrica celular engrossada baseada em forças estruturais.

4 Metodologia

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do projeto é denominada Design Science Research (Van Aken, 2004), e consiste em um modelo de pesquisas efetivamente direcionadas ao projeto de artefatos que sustentem melhores soluções para os problemas existentes (Lacerda et al., 2013). Trata-se de um conhecimento de

caráter não descritivo-explicativo, mas prescritivo, ou seja, é intencionalmente pragmática, normativa e sintética, baseada em experimentações práticas, neste caso a concepção, desenvolvimento e aprimoramento de estruturas arquitetônicas paramétricas impressas em 3d utilizando sólidos celulares.

A primeira etapa desta metodologia é denominada conscientização, que define e formaliza o problema a ser solucionado. Em seguida há a etapa de desenvolvimento, que corresponde ao processo de constituição do artefato em si e sua submissão a condições de exigência de sua performance. O Desenvolvimento implica diversos ciclos de avaliação e aprimoramento do artefato até obter resultado relevante de seu estado funcional, tendo em vista o problema inicial. Ao longo da etapa de Desenvolvimento serão utilizadas simulações computacionais nos softwares Rhinoceros e Grasshopper, experimentos em laboratório utilizando máquina de impressão 3D Machine One e Cube Pro, e máquinas de corte a laser WS4040. Os ciclos de desenvolvimento adotaram uma avaliação tanto qualitativa quanto quantitativa do artefato desenvolvido frente aos problemas práticos. Finalmente, a etapa de Aplicação consiste em testar a viabilidade dos artefatos desenvolvidos em um contexto de utilização na escala de protótipo.

5 Resultados e Discussão

5.1 Referências de projeto

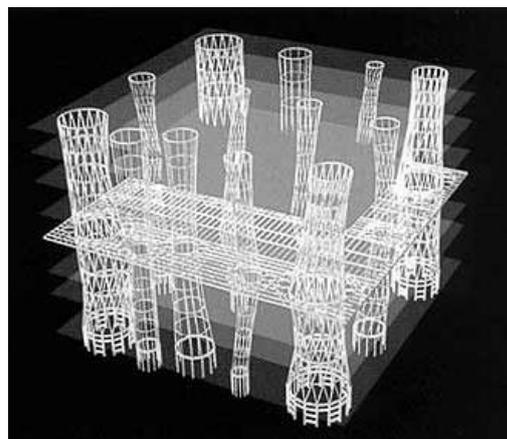
Um ponto importante para a realização da discussão é a pesquisa de referências projetuais. Dessa forma, alguns projetos se destacaram pelas características equivalentes às dos sólidos celulares anteriormente apresentadas.

Em primeiro lugar, está a Mediateca de Sendai observada na Figura 1, feita por Toyo Ito & Associates em 2000. Está localizada em Sendai-shi, no Japão, tem sua estrutura em aço e consiste em três elementos básicos: “chapa”, “tubo” e “pele”.

Figura 1 – Mediateca de Sendai (2000). (a) Vista da fachada frontal do edifício e (b) esquema da estrutura do prédio, com destaque para os sólidos celulares



(a)



(b)

Fonte: Archdaily Clássicos da Arquitetura: Mediateca de Sendai / Toyo Ito & Associates [online]. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/01-25662/classicos-da-arquitetura-mediateca-de-sendai-toyo-ito-e-associates#_=_> Data: 04/02/2012. Acesso em: 23/06/2021

Em segundo lugar, está a Biblioteca Jussieu, (Figura 2), por Rem Koolhaas em 1992, que, ao invés de empilhar um nível sobre o outro, as plantas baixas são manipuladas para se conectarem; formando assim uma única trajetória - bem como um bulevar interior que serpenteia por todo o edifício. Além disso, os elementos específicos das bibliotecas são reimplantados na nova esfera pública como edifícios em uma cidade.

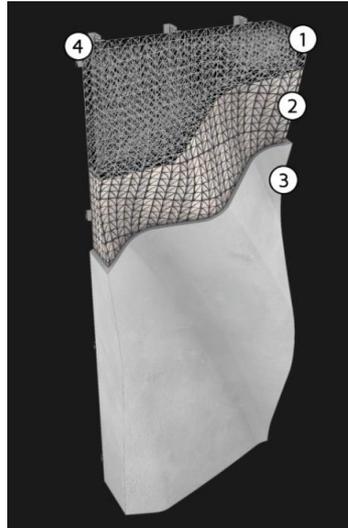
Figura 2 – Biblioteca Jussieu (1992). (a) Maquete com os objetos dos pavimentos posicionados e (b) vista frontal da maquete com destaque para a diferenciação dos níveis



Fonte: Pinterest Rem Koolhaas, Jussieu Library, Paris, 1992 [online]. Disponível em: <https://br.pinterest.com/tim_jacoby/rem-koolhaas-jussieu-library-paris-1992/> Acesso em: 23/06/2021

Outro projeto que merece destaque é tecnologia construtiva feita pela Branch Technology da Matrix Freeform 3D. É inovadora e possui características únicas. É formada por quatro partes, como pode ser observada na Figura 3: a primeira, uma matriz de polímero de forma livre. É baseada em estruturas celulares de organismos vivos e emprega biomimética geométrica para atingir a alta relação resistência-peso do produto. A treliça estrutural garante uma força máxima e uso mínimo de material, além de ser impresso em 3D. A segunda, é um composto preenchido e moído. As células abertas permitem a introdução de materiais complementares que, quando combinados, aumentam as capacidades estruturais e propriedades do material existentes. É um composto multimaterial que garante a personalização de densidade, combinações de materiais, requisitos de conexão e tamanhos de painel. Em seguida, o painel de fachada acabado. Com base nas capacidades dos painéis de matriz preenchida e fresada, esses componentes serão enviados para o local com acabamento em GFRC ou estuque sintético. Por último, conexões e hardware. A estrutura permite conexões com hardware padrão de indústria e acessórios estruturais projetados totalmente sob medida.

Figura 3 – Matrix Freeform 3D



Fonte: Branch Technology [online]. Disponível em: <<https://www.branch.technology/products>>. Acesso em: 08/07/2021

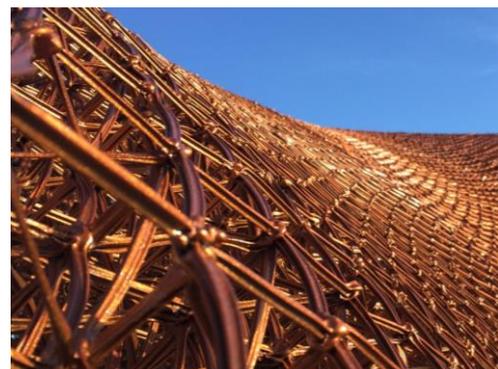
Legenda: 1- Matriz de polímero de forma livre. 2- Composto preenchido e moído. 3- Pannel de fachada acabado. 4- Conexões e hardware.

Também merece destaque a Design Miami Pavilions (Figura 4) localizada em Miami, Flórida, que foi feita pela SHoP Architects, em colaboração com a Oak Ridge National Laboratory (ORNL) e a Branch Technology em 2016. Construída com metal e bancos de bambu biodegradáveis, a intenção era inspirar-se no espírito lúdico de Miami, na morfologia dinâmica da praia e na função emergente da cidade como um centro de visão criativa e descoberta tecnológica.

Figura 4 – Design Miami Pavilions (2016). (a) Vista do interior do pavilhão (b) detalhe construtivo da estrutura celular e (c) vista do exterior do pavilhão



(a)



(b)



(c)

Fonte: Branch Technology [online]. Disponível em: <<https://www.branch.technology/projects-1/2017/6/9/shop>>. Data: 01/09/2017. Acesso em: 08/07/2021

Já na Trabeculae Pavilion (Figura 5) há a combinação de Additive Manufacturing e design computacional bioinspirado. Feita por Roberto Naboni e Delta WASP em 2018 e localizada na Politecnico di Milano, Itália, as células internas formam micro estruturas ósseas que possuem um máximo aproveitamento de material. É uma impressão 3D, através da Fused Deposition Modeling - FDM, e responde às cargas, ainda que com mudanças em seu dimensionamento, topologia, orientação e seção.

Figura 5 – Trabeculae Pavilion (2018). (a) Vista do exterior do pavilhão e (b) detalhe construtivo da estrutura celular



(a)



(b)

Fonte: ACTLAB [online]. Disponível em: <<https://www.act-lab.net/trabeculae-pavilion.html>>. Acesso em: 08/07/2021

Outro projeto é o da equipe e alunos da Oxford Brookes University. O Rain Pavillion (Figura 6) localizado em Oxford, Inglaterra e feito em 2014, é um complexo de 16 estruturas de árvores de aço inoxidável e exigiu modelagem de vento extensa e uma análise estrutural igualmente abrangente dentro de um modelo 3D generativo.

Figura 6 – Rain Pavillion (2014). (a) Vista do complexo e (b) detalhe construtivo da estrutura



Fonte: Format Engineers [online]. Disponível em: <<https://formatengineers.com/projects/oxford-brookes-rain-pavilion.html>>. Data: 01/03/2014. Acesso em: 08/07/2021

A Arborecence, (Figura 7), localizada em Amsterdã, Holanda, foi feita pela Loop.pH em 2014 e se destacou pois consiste em um conjunto de superfícies em arco interdependentes feita de fibra de vidro. A forma possui um grande número de membros (acima de 55.000), com anéis entrelaçados e um deck flutuante.

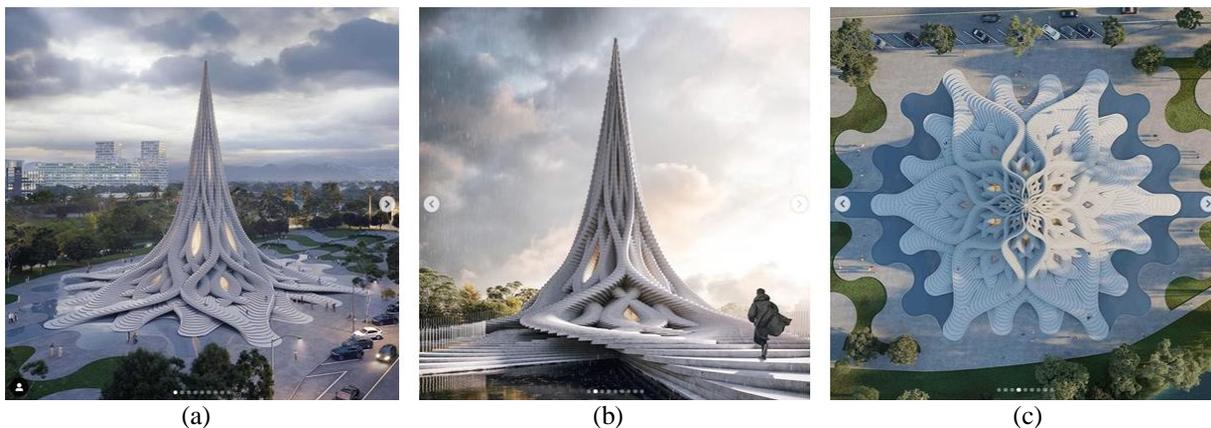
Figura 7 – Arborecence (2014). (a) Vista da estrutura iluminada e (b) decks flutuantes com a estrutura desligada e desmontada



Fonte: Format Engineers [online]. Disponível em: <<https://formatengineers.com/projects/arborescence.html>>. Data: 01/012/2014. Acesso em: 08/07/2021

Finalmente, o "Rain Water Catcher" é uma proposta de projeto de 2020 de competição para uma torre em San Jose nos Estados Unidos para a San Jose Light Tower Corporation e pode ser observada na Figura 8. Foi feita pelo grupo Nudes e a ideia é abordar o impacto global das mudanças climáticas, defendendo a necessidade para a conservação da água em direção à redução da emissão de carbono guiada pela utilização do design líquido zero. "Água" é igual a "Vida". O "RainWater Catcher" visa celebrar o papel e a importância da água em nossas vidas.

Figura 8 – Rain Water Catcher (2020). (a) Fachada do projeto, (b) perspectiva do usuário no projeto e (c) vista superior da construção

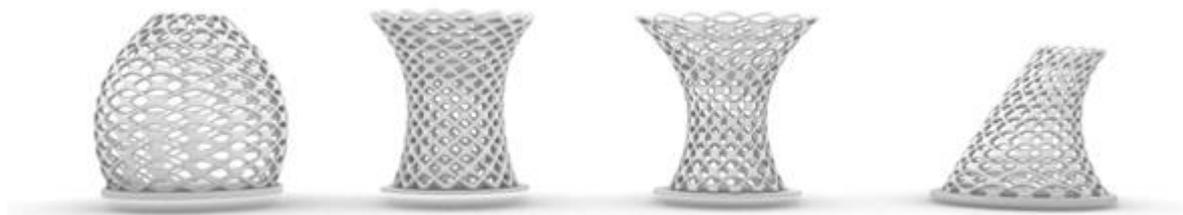


Fonte: Instagram @nurukarim. Data: 01/10/2020. Acesso em: 12/07/2021

5.2 Experimentos

Na etapa do Workshop de Modelagem Generativa, foram utilizados alguns plug-ins, com influências variadas na construção dos objetos celulares: Weaverbird (editor topológico permite que malhas sejam subdivididas e transformadas), Mesh (influencia na grande variedade de edição de malhas, design e modificação topológica) e Parakeet (tem foco na geração de padrões algorítmicos e permite gerar padrões geométricos). No Workshop, códigos e estruturas foram criadas com a utilização dos plug-ins escolhidos (Figura 9).

Figura 9 – Formas criadas no Workshop de Modelagem Generativa (da esquerda para direita: forma 1,2,3,4).

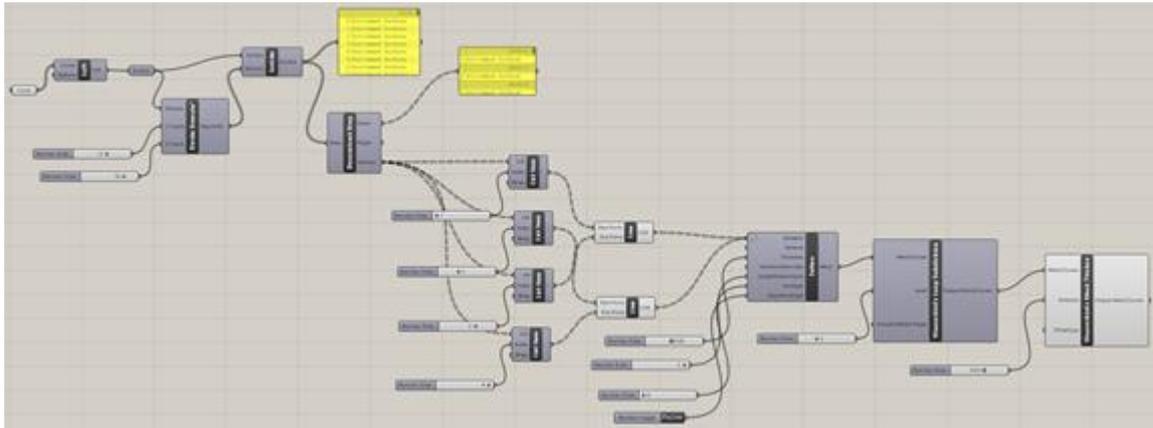


Fonte: Autora (2020).

Com relação ao processo de concepção das formas do Workshop, foi possível experimentar cada plug-in e sua influência na criação dos códigos, assim como na construção dos objetos celulares. As experiências feitas podem ser melhor observadas no Anexo B.

Ao final do Workshop, foi possível construir códigos com sucesso, utilizando o diagrid (Figura 10). As curvas foram, primeiramente, criadas no Rhinoceros e serviram de base para a criação do restante do código. Logo, a programação da subdivisão das superfícies das células foi feita e a associação das curvas com o restante da programação foi executada. Por fim, os “pipes” (canos) foram aplicados na estrutura e códigos do plug-in Weaverbird adicionados para atingir a forma desejada.

Figura 10 – Código criado com sucesso no Workshop de Modelagem Generativa



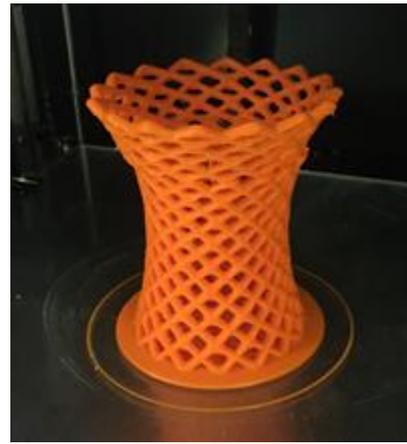
Fonte: Autora (2020).

Em um último momento, a impressão 3D da forma 2 do código diagrid foi realizada, em escala reduzida, utilizando o PLA. O resultado encontrado pode ainda ser aprimorado, mas foi considerado um êxito (Figura 11).

Figura 11 – (a) Forma 2: sólido escolhido para impressão (b) Sólido após impressão 3D



(a)



(b)

Fonte: Autora (2020).

A impressão 3D de alguns modelos criados foi muito importante para o entendimento da estrutura e como ela se comportaria se construída em escala real. Foi observado, inclusive nessa fase de produção em proporções menores, que bases muito finas e com pouca superfície de contato seriam inviáveis por serem muito frágeis e gerarem o descolamento da peça no ato de sua fabricação digital. Isso pode ser melhor observado no Anexo B. Ainda, foi possível perceber que o tempo de impressão varia dependendo da forma criada, além da quantidade de camadas necessárias para conclusão do protótipo. No Anexo B estão disponíveis algumas imagens das diferentes formas construídas no Workshop de Modelagem Generativa e seus respectivos tempos de impressão, a fim de compará-los. Estão disponíveis ainda, neste mesmo Anexo, mais figuras que apresentam um pouco de como os sólidos celulares são vistos no programa Rhinoceros, a malha do objeto evidenciada pela vista do interior da peça e, com relação a criação em 3D, as camadas da construção evidenciadas pelo software de impressão.

6 Conclusões

Os sólidos celulares são de morfologia complexa e apresentam muitas características únicas. As estruturas não lineares (topológicas), são uma propriedade desses sólidos. Estas são produzidas a partir de uma demanda, ou seja, de acordo com o esforço necessário para cada situação. A espessura não é linear, ela diminui com a redução do esforço e vice-versa. Essa particularidade pode ser observada no projeto Sandwaves, discutido anteriormente. A estrutura é mais compacta na parte inferior, pois o peso é maior, e mais delgada na parte superior pois o peso é menor. Outro exemplo seria o Trabeculae Pavilion que, além de possuir essa diferenciação na espessura, dispõe de uma transição suave e orgânica das peças. Isso só pode ser feito através da impressão 3D.

Outro ponto seria a impressão na edificação. Esta não é fruto de um único método construtivo, mas sim, de vários que ainda estão sendo inventados. Há vários processos de produção: camadas de cerâmica, argila, cimento, etc. Um exemplo dessa diferenciação de meios construtivos é o da Branch Technology, com sua Matrix Freeform 3D, que não utiliza a fabricação camada por camada, como a do Trabeculae Pavilion, é uma matriz de polímero de forma livre. Esta é uma tecnologia adaptada para impressão 3D. Assim, é possível perceber que a impressão 3D possui muita capacidade e de crescimento, e para que haja uma evolução dessa ferramenta, é preciso que pesquisas sobre o tema sejam feitas, pois ainda há muito o que ser explorado e criado, principalmente.

Além disso, para que seja possível o desenvolvimento da impressão 3D, a morfologia, ou seja, o design precisa evoluir. A busca pela diminuição de materiais não é nova, o desenvolvimento de armações leves na arquitetura já era feito, por exemplo, pelas treliças espaciais. Contudo, com os sólidos celulares, as estruturas se tornam muito mais complexas, e, por isso, deve haver um desenvolvimento de programas de computador, a fim de gerar formas mais avançadas.

Autores como Leach (2017) acreditam que o destino da impressão 3D estará limitado à escala de objetos de proporções reduzidas como elementos de design e mobiliário, uma vez que o aumento da proporção das peças impressas acarreta um incremento exponencial do seu peso próprio e por isso inviabilizaria sua aplicação. Entretanto, ao contrário do que Leach diz, a impressão 3D é possível para modelos em escalas maiores, como foi exemplificado nos projetos anteriores. Isso se deve pois o aumento da escala dos objetos está associado a uma diminuição da massa, ou seja, quanto maiores, mais aeradas e mais celulares se tornam.

Por fim, é importante destacar que deve haver uma transformação do objeto em menor escala para viabilizar sua construção em tamanho maior, porém isso não impossibilita sua confecção. O sólido celular é a solução para esse aumento já que há a diminuição do material necessário. Um exemplo disso é a TECLA, discutida anteriormente. Este já é um projeto em escala de edifício, mas para evitar o grande uso de material é aerada no interior de suas camadas. Deste modo, é possível contestar a afirmação de Leach, que não considerou o grande espaço para a evolução das tecnologias de impressão 3D, assim como o uso de sólidos celulares nesses projetos.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio financeiro recebido pelo CNPq relativo à bolsa de Iniciação Científica. Agradecemos ainda, todos os participantes do Workshop de Modelagem Generativa e do Workshop Arquitetura em Tempos de Pandemia, em especial a Ygor Steiner e Luisa Gutierrez.

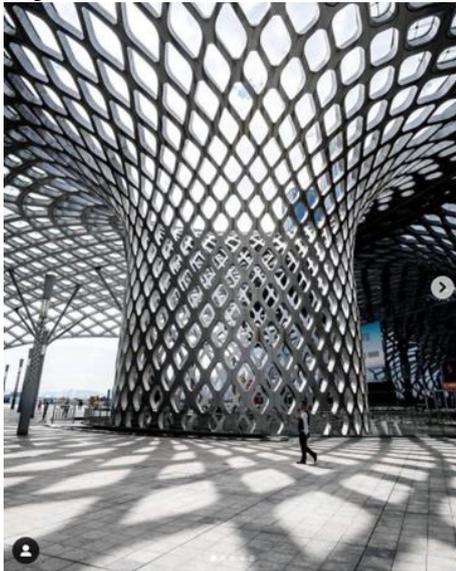
Referências Bibliográficas

- AJDARI, AMIN. **Mechanical Behavior of Cellular Structures: A Finite Element Study**. 2008. 86 p. Tese (Master of Science in Mechanical Engineering) - Northeastern University, Boston, Massachusetts, 2008.
- BHATE, D. **Four questions in cellular material design**. *Materials*, [s.l.], v. 12, no 7, p. 13, 2019. ISSN: 19961944, DOI: 10.3390/ma12071060.
- ERJAVEC, Mateja; ZIHERL, Primož. **Mechanical properties of cellular materials**. 2011. 15 p. Seminário (Mathematic and Physics) - University of Ljubljana, Ljubljana, Eslovenia, 2011.
- GIBSON, L. ASHBY, M. **Cellular Solids – Structure and properties**. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- HANNA, S.; TURNER, A. **Teaching Parametric Design in Code and Construction**. Image (Rochester, N.Y.), [s.l.], p. 158–161, 2006.
- JOSE, S. **Additive Manufacturing and Stress Analysis of Naturally and Artificially Obtained Cellular Structures**. 2015. 54 p. Dissertação (Master of Science in Mechanical Engineering) - The University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, 2015.
- LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENCA, A.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gest. Prod.** [online]. 2013, vol.20, n.4, pp.741-761. Epub Nov 26, 2013. ISSN 0104-530X. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2013005000014>.
- LEACH N. Size Matters – why body architecture is the future of 3d printing. **Architectural Design**, 87:6, 2017, pp 76-83.
- NABONI, R.; KUNIC, A. **Design and Additive Manufacturing of Lattice-based Cellular Solids at Building Scale**. São Paulo: Blucher, 2017. p. 369-375.
- ROCHA, B. M.; et al. The 3d printing fabrication of cellular solids structures and its use in architecture, p. 878-885. In: **Congresso SIGraDi 2020**. São Paulo: Blucher, 2020. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/sigradi2020-119
- ROCHA, B.; BOLSSONI, G.; BUSSOLOTI, V. Ecologias de Projeto: métodos e processos em arquitetura digital. Em: **9 Fórum de Pesquisa FAU-Mackenzie**, [s. l.], p. 265-276, 2019. DOI 10.5935/FAU.20190019. Disponível em: <http://www.territorios.org/rede/pdf/ecologias.pdf>. Acesso em: 15 set. 2021.
- SAKIN, M.; KIROGLU, Y. C. **3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM**. *Energy Procedia*, [s.l.], v. 134, p. 702–711, 2017. ISSN: 18766102, DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.562.
- SCHAEDLER, T. A.; CARTER, W. B. **Architected Cellular Materials**. *Annual Review of Materials Research*, [s.l.], v. 46, p. 187–210, 2016. ISSN: 15317331, DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-031624.
- TRAMONTANO, M. **Quando pesquisa e ensino se conectam: design paramétrico, fabricação digital e projeto de arquitetura**. [s.l.], p. 544–550, 2015. DOI: 10.5151/despro-sigradi2015-100144.
- VAN AKEN, J. E. Management Research Based on the Paradigm of the Design Sciences: The Quest for Field-Tested and Grounded Technological Rules. **Journal of Management Studies**, v. 41, n. 2, p. 219-246, 2004. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-6486.2004.00430.x>

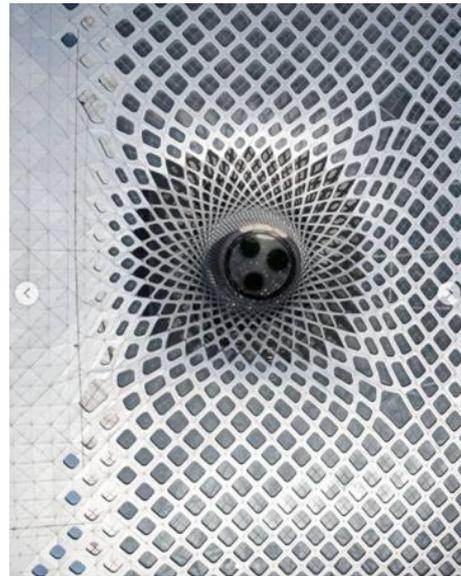
Anexo A

A seguir, estão algumas referências dos projetos discutidos em cada ponto abordado no embasamento teórico, a fim de garantir um melhor entendimento destes conceitos.

Figura 1 – Shenzhen Bay Sport Center (2011). (a) Vista frontal do interior do projeto e (b) vista superior do edifício



(a)



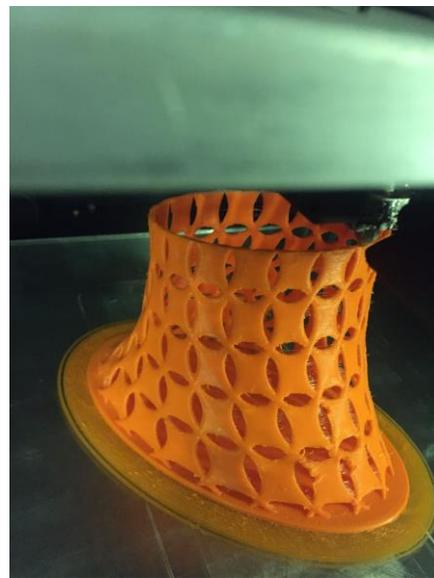
(b)

Fonte: Instagram @parametric.architecture. Data: 28/12/2020. Acesso em: 23/06/2021

Figura 2 – (a) Impressão 3D de protótipo com códigos no Grasshopper e (b) Protótipo do Workshop de Modelagem Generativa



(a)



(b)

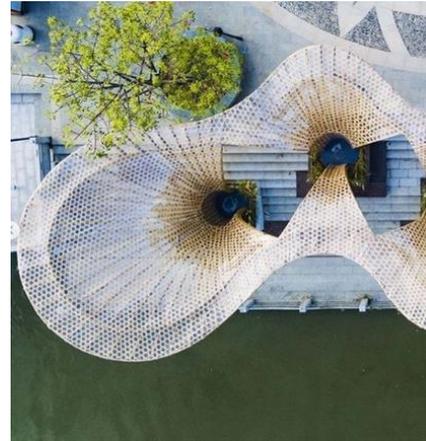
Fonte: (a) Rocha et al. (2020)

(b) Autora com contribuição dos participantes do Workshop (2020)

Figura 3 – Huanglong Waterfront Bamboo (2020). (a) Vista do canal em perspectiva, (b) vista superior e (c) vista frontal do projeto



(a)



(b)



(c)

Fonte: Instagram @parametric.architecture. Data: 17/05/2021. Acesso em: 23/06/2021

Figura 4 – TECLA (prevista para 2021). (a) Detalhe do interior de uma camada, (b) construção camada por camada, (c) vista do interior de um dos núcleos do projeto e (d) imagem esquemática da construção do complexo



(a)



(b)



(c)



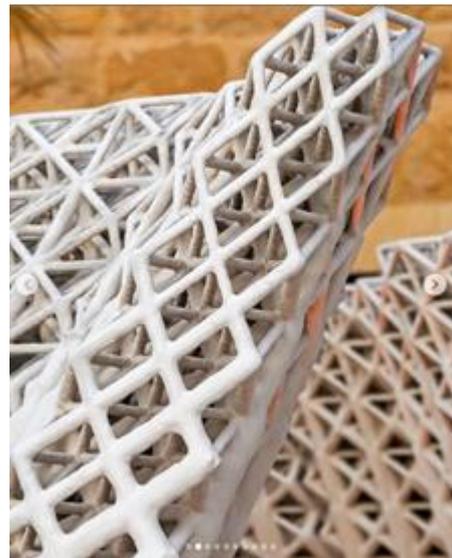
(d)

Fonte: Instagram @parametric.architecture. Data: 02/10/2020. Acesso em: 23/06/2021

Figura 5 – Sandwaves (2019). (a) Vista dos bancos como conjunto e (b) detalhe da estrutura celular



(a)



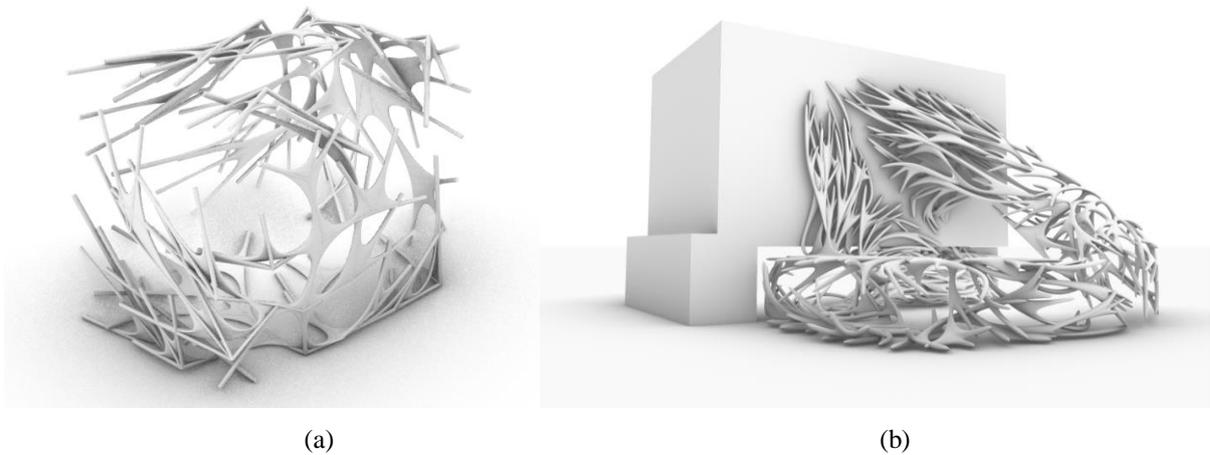
(b)

Fonte: Instagram @parametric.architecture. Data: 05/03/2021. Acesso em: 09/03/2021

Anexo B

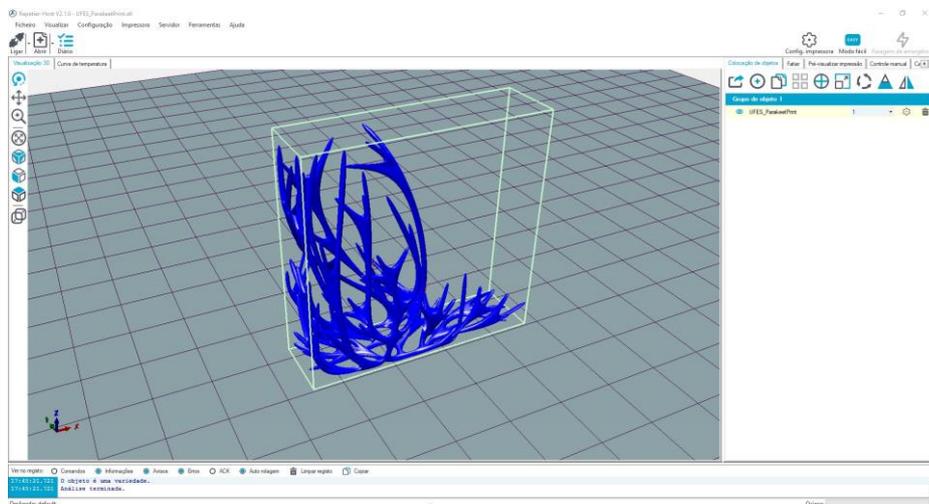
Neste anexo estão disponibilizadas algumas imagens feitas no Workshop de Modelagem Generativa para melhor compreensão do trabalho desenvolvido, assim como a demonstração das experiências criadas.

Figura 1 – (a) e (b) Sólidos produzidos no Workshop de Modelagem Generativa com o plug-in Parakeet



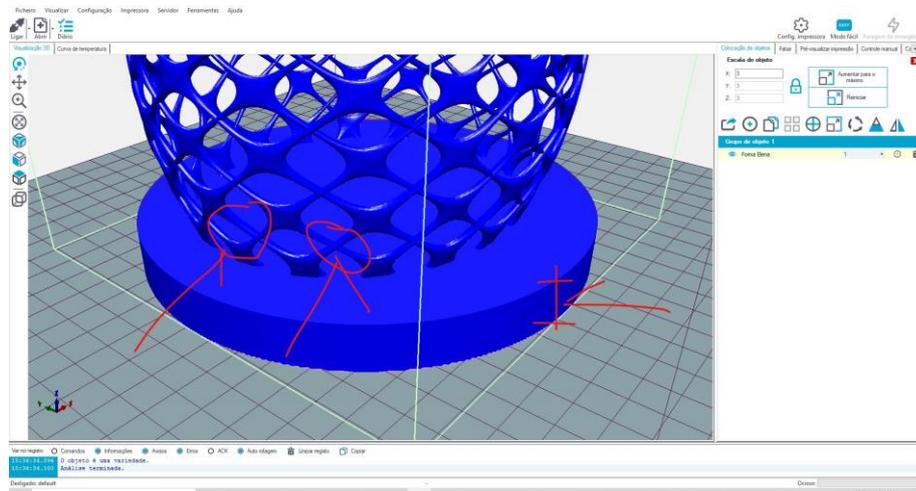
Fonte: Autora com contribuição dos participantes do Workshop (2020)

Figura 2 – Sólidos produzidos no Workshop de Modelagem Generativa com o plug-in Parakeet visto no programa de impressão 3D



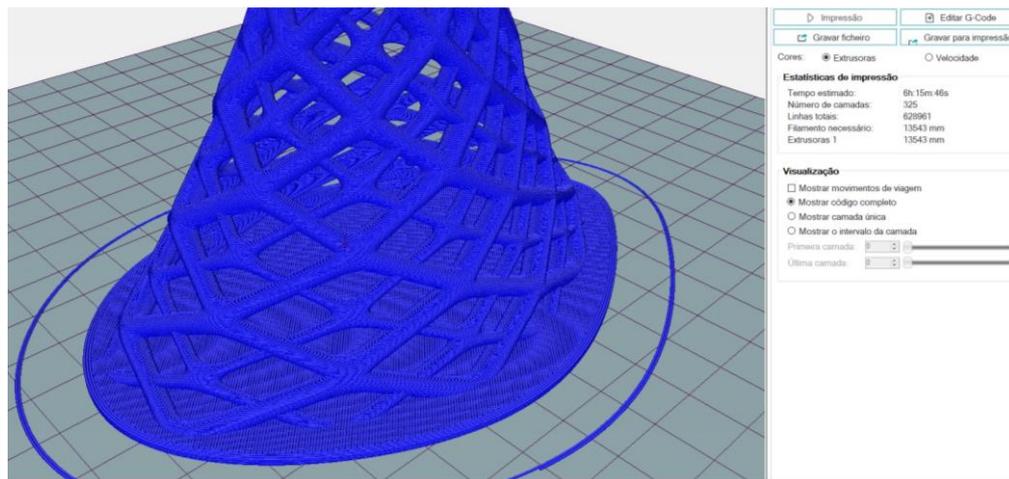
Fonte: Autora com contribuição dos participantes do Workshop (2020)

Figura 3 – Sólido com demarcação das limitações encontradas com a impressão 3D em FDM

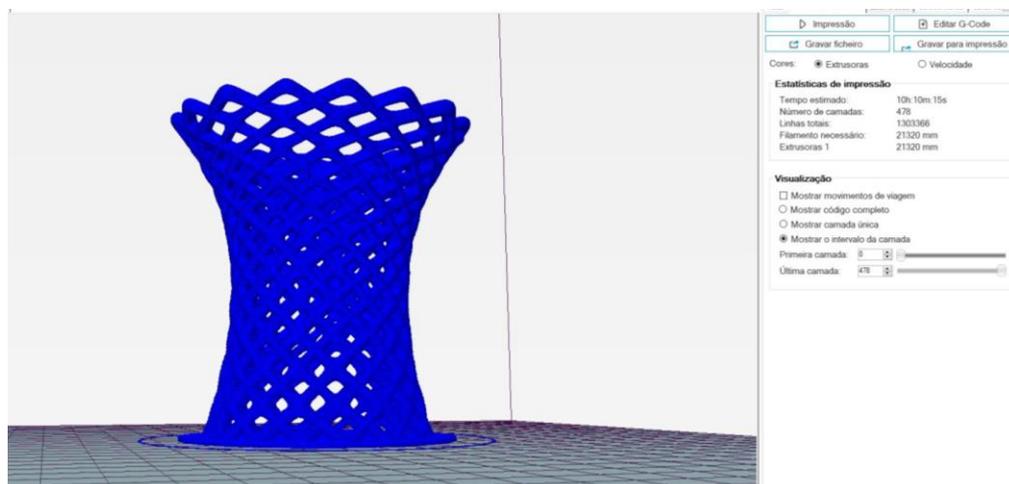


Fonte: Autora com contribuição dos participantes do Workshop (2020)

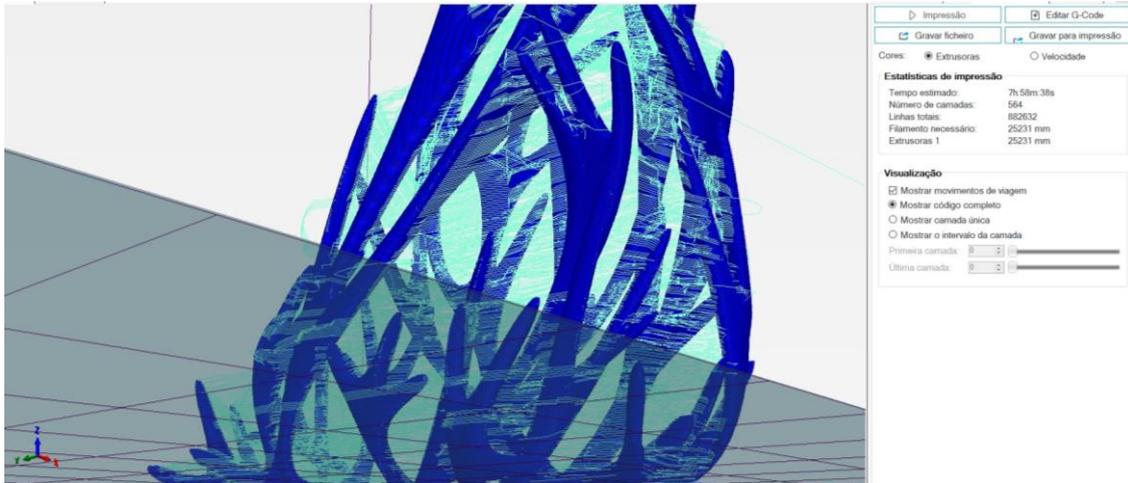
Figura 4 – (a), (b) e (c) Tempos de impressão programados para construção de alguns protótipos realizados no Workshop de Modelagem Generativa



(a)



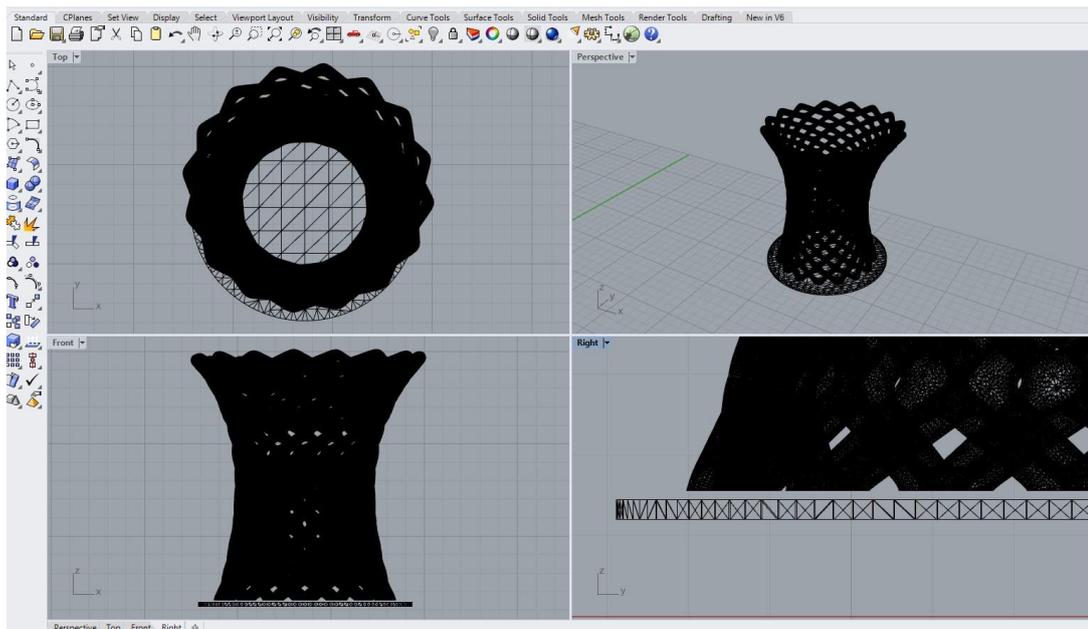
(b)



(c)

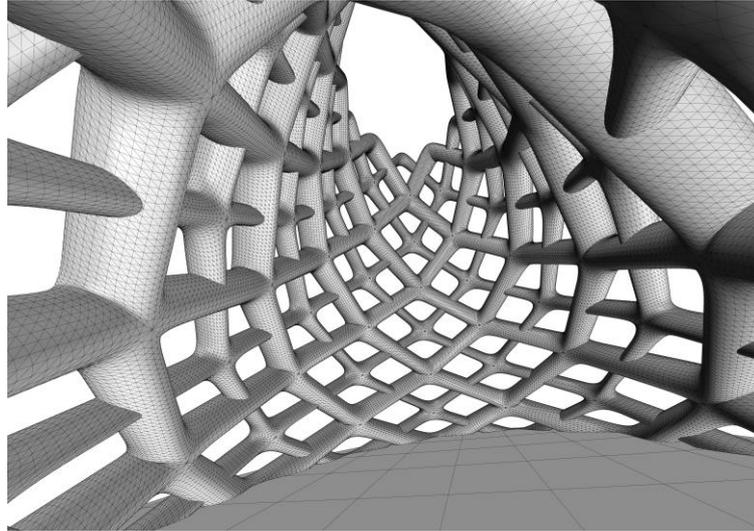
Fonte: Autora com contribuição dos participantes do Workshop (2020)

Figura 5 – Diferentes vistas de um dos sólidos construído no Workshop dentro do programa Rhinoceros



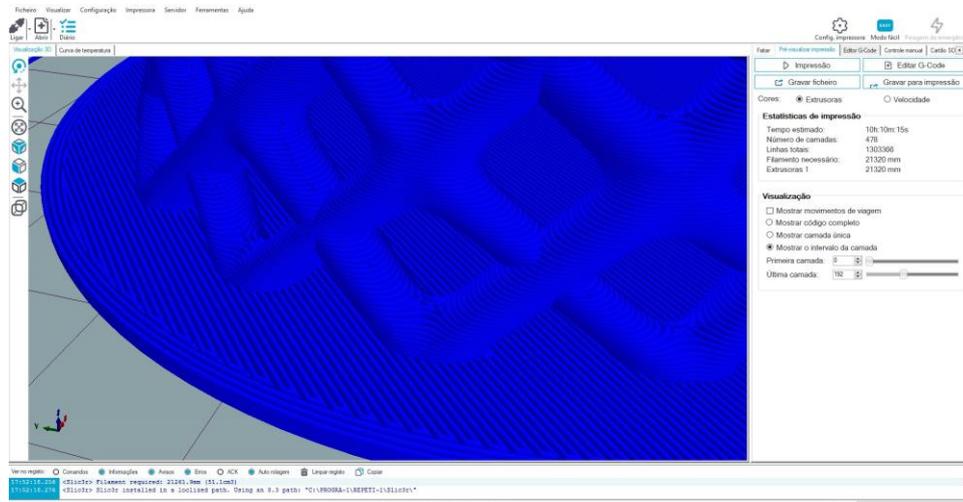
Fonte: Autora com contribuição dos participantes do Workshop (2020)

Figura 6 – Vista do interior de um dos sólidos do Workshop, com evidência nas malhas do objeto



Fonte: Autora com contribuição dos participantes do Workshop (2020)

Figura 7 – Camadas para a construção do protótipo do sólido celular em 3D no programa de impressão



Fonte: Autora com contribuição dos participantes do Workshop (2020)