

## The 3d printing fabrication of cellular solids structures and its use in architecture

**Bruno Massara Rocha**

Universidade Federal do Espírito Santo | Brasil | [bmassara@gmail.com](mailto:bmassara@gmail.com)

**Ygor Facco Steiner**

Universidade Federal do Espírito Santo | Brasil | [ygorsteiner@gmail.com](mailto:ygorsteiner@gmail.com)

**Leonardo Valbão Venancio**

Universidade Federal do Espírito Santo | Brasil | [leovalbao@gmail.com](mailto:leovalbao@gmail.com)

**Sara Rodrigues Lauwers**

Universidade Federal do Espírito Santo | Brasil | [saralauwers95@gmail.com](mailto:saralauwers95@gmail.com)

### Abstract

This article shows the results of the application of parametric design process in the digital fabrication of cellular solids inspired structures by 3d printing in model scale. Two proposal will be presented. Both are devised according to the idea of creating resistant wireframe cellular structure with zero-waste of printing material. The methodology was based in the application of three steps design science research into two different parametric patterns: diagrid and voronoi. It is shown the analytic description of both processes with 3d printed models. The conclusion is that the diagrid pattern offers better control of the design than the voronoi.

**Keywords:** Cellular solids; Metamaterials; 3d printing; Parametric Design; Architecture Design.

## INTRODUÇÃO E PROBLEMATIZAÇÃO

Com a escassez dos recursos naturais é necessário que as disciplinas de projeto e construção encontrem novas morfologias e técnicas de produção mais econômicas e de melhor performance. Este processo de inovação nos meios de se criar e produzir é fundamental para que se alcancem a diminuição dos desperdícios e a maior vida útil dos objetos construídos. Com esse horizonte, investigam-se aqui os sólidos celulares e discutimos seu potencial em atender as novas adversidades ecológicas que, não apenas a arquitetura, mas o design e a engenharia enfrentam.

Os sólidos celulares são estruturas leves e aeradas que podem ser encontrados em diversas aplicações na arquitetura como, por exemplo, na composição de materiais isolantes, preenchimentos, materiais de flutuação, acabamentos etc. No entanto, percebe-se que sua investigação enquanto elementos estruturais para móveis e edificações ainda é restrita no Brasil, não havendo empresas dedicadas a esse tipo de aplicação como ocorre no exterior. Isso se deve ao fato de que o processo de fabricação de sólidos celulares estruturais exige um desenvolvimento de tecnologia avançado para uso na concepção e fabricação, pouco disponíveis aqui. Métodos tradicionais não oferecem condições para produção em escala estrutural, restringindo o uso dos sólidos celulares a materiais secundários. No entanto, com o aperfeiçoamento dos recursos de fabricação digital a produção de estruturas arquitetônicas com arranjos

celulares tem se mostrado mais viável, e esse é o foco da pesquisa que aqui se apresenta.

Naboni (2017) comenta que uma das contribuições dos os sólidos celulares é que são capazes de oferecer uma otimização na fabricação de peças sob medida, com uma quantidade muito menor de material e um ganho de performance em função de uma morfologia específica. O autor afirma ser possível alcançar com os sólidos celulares estruturas significativamente mais leves com um mínimo de perda da resistência quando comparadas àquelas constituídas de materiais totalmente sólidos. Embora as aplicações estruturais dos sólidos celulares sejam recentes, já é possível identificar inúmeros projetos relevantes como os desenvolvidos pelos grupos internacionais: *Block Research Group*, *Actlab*, *Format Engineers* e *Branch Technology*. Uma análise inicial destes projetos revela que a associação entre estruturas celulares e métodos de impressão 3d vem permitindo obter resultados consideravelmente importantes para um sistema construtivo leve, fabricado com baixíssima perda de material e extremamente resistente.

A associação entre morfologias complexas e fabricação digital tem se mostrado promissora na arquitetura porque combina três fatores fundamentais: o potencial arquitetônico das estruturas celulares (gama enorme de referências biomiméticas), a enorme precisão dos processos de fabricação digital (métodos aditivos e subtrativos) e a alta complexidade dos processos de concepção paramétricos (alto potencial de

experimentação e simulação). Em outras palavras, os processos paramétricos permitem conceber estruturas celulares com grande segurança e controle morfológico e a fabricação digital oferece a precisão necessária para produzi-las fisicamente.

No entanto, os principais desafios para atingir este objetivo encontram-se, em primeiro lugar, no desenvolvimento uma programação específica para geração de estruturas celulares, o que Speaks (2002) define como inteligência de projeto. Em segundo lugar, é essencial a compreensão técnica das melhores configurações de impressão 3d para a fabricação correta sem perda de material, o que não é tão simples quanto se imagina. E, em terceiro lugar, a complexificação exponencial que a ampliação das escalas de construção gera para arquitetos e engenheiros (do protótipo para a construção 1:1). Esta é uma questão bastante discutida e problematizada por Leach (2017) que nos lembra que, ao dobrar as dimensões de um objeto físico, seu volume aumenta oito vezes, em fator exponencial. Isso tem implicações decisivas na produção de um protótipo em escala reduzida para outro na escala real, principalmente no que se refere à resistência dos materiais constituintes, conexões e viabilidade do arranjo morfológico.

A pesquisa que aqui apresentada traz duas experiências de fabricação de estruturas sólidas celulares em escala reduzida (protótipos). Nelas, busca-se oferecer respostas para desafios principais: a) criação de uma inteligência de projeto paramétrico para estruturas celulares e b) as configurações de impressão mais adequadas para sua fabricação considerando a perda-zero de material. Quanto à produção de estruturas em escala real, há um impedimento técnico que é o acesso a impressoras maiores como é o caso das fabricadas pela empresa italiana *3D Wasp*, ou ainda a aplicação de um braço robótico modelo *Kuka* adaptado para receber um bico de impressão.

## OBJETIVOS

Nossa pesquisa tem como objetivo geral a aplicação do potencial dos sólidos celulares em estruturas arquitetônicas com o auxílio de métodos de impressão em 3d. Pesquisas pregressas que relacionam os sólidos celulares e impressão 3d já configuram um campo de investigação existente formado por autores como Sakin & Caner (2017), Subrin et. al (2018) e Ozkil (2017). Em termos de estruturas arquitetônicas estudos como Schaedler & Carter (2016) oferecem um ponto de partida.

Como objetivos específicos temos: a) buscar concepções morfológicas de baixo impacto ambiental e com um mínimo desperdício de material para a produção dos protótipos; b) representar estas concepções em inteligências de projeto (Speaks, 2002) específicas, no formato de programações gráficas computacionais que controlam as variáveis e permitem a produção de padrões sob demanda; c) avaliar as potencialidades dos arranjos celulares para aplicação em projetos de arquitetura; e d) realizar uma análise comparativa entre dois arranjos morfológicos diferentes, avaliando potencialidades e limitações em cada um deles.

## CONCEITOS FUNDAMENTAIS

### SOBRE OS SÓLIDOS CELULARES

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 (Sachin, 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, fluotubabilidade, 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). Neste trabalho trouxemos dois exemplos de processos de produção de estruturas arquitetônicas inspiradas em sólidos celulares com topologia anisotrópica: *Diagrid* e *Voronoi*.

A diferença entre propriedades isotrópicas e anisotrópicas diz respeito à relação entre a estrutura interna das células e a sua resistência. De acordo com Gibson & Ashby (1999) uma estrutura é anisotrópica quando a resistência da estrutura depende do formado das células e com isso pode ser definida em um sentido específico, por exemplo, no sentido longitudinal às morfologias das células. Materiais de características anisotrópicas como madeiras e ossos apresentam uma morfologia celular complexa, não-linear e, por isso, são mais resistentes nos eixos longitudinais à posição de suas fibras ou feixes. Na verdade, uma grande parte das estruturas celulares naturais são anisotrópicas. Uma estrutura é isotrópica quando sua resistência não depende de um sentido de orientação específico. Os materiais isotrópicos são formados por células simétricas, de arranjo modular e proporcional em todas as direções. Materiais que apresentam estrutura celular formada por grelhas compostas por polígonos regulares (hexagonais, quadrados, triangulares etc.) apresentam a mesma resistência para todos os sentidos de esforço.

Um dos modelos propostos aqui utiliza o padrão do diagrama de *Voronoi* para conceber células em arranjos tridimensionais. As células de *Voronoi* são poliedros convexos formados por faces planas delimitadas pelas interseções de volumes de vizinhança (Bueno, 2016, p. 63). Em termos gerais, diagramas de *Voronoi* são padrões geométricos não-lineares frequentemente utilizados por arquitetos e designers como referência para a concepção de elementos estruturais, padrões de vedação, coberturas dentre outras aplicações. Sua modelização foi consideravelmente aprimorada pelos recursos paramétricos elaborados por David Rutten criador do software *Grasshopper*. Por meio do *Grasshopper* diferentes tipos de padrões de aplicação podem ser criados, aplicados, configurados em projetos de arquitetura, tornando-se um suporte essencial para a utilização operativa do conceito *Voronoi*.

Outro padrão geométrico utilizado nesta pesquisa é o *Diagrid*, cuja morfologia básica é uma grelha tridimensional de barras dispostas em diagonal, também

conhecido como tesselação (*tesselation*). Tesselação é um termo de origem latina (*tessellatus*) cujo significado diz respeito a arranjos compostos por pequenos blocos de pedra ou azulejos, fazendo referência à expressão grega *tessare* (número quadro), composto por quatro corners (Etymonline, 2020). O padrão *diagrid* tem um grande potencial de aplicação em processos de impressão 3D uma vez que ele se adapta convenientemente à impressão de protótipos sem necessidade de suportes adicionais e, consequentemente, sem geração de resíduo e custos adicionais.

## **PARTICULARIDADES DA IMPRESSÃO 3D E DA MODELAGEM PARAMÉTRICA**

A produção dos protótipos aqui apresentados considerou aspectos conceituais e posturas de ação bastante específicas em seu desenvolvimento procurando assumir um caráter experimental e exploratório do processo de impressão 3D e da modelagem paramétrica.

A manufatura aditiva, como é tecnicamente conhecida a impressão 3D, é um processo de prototipagem rápida a partir da sobreposição de camadas de material. A deposição das camadas de material (pó, polímeros, gel) pode ser realizada com diferentes técnicas. Independentemente da técnica, a prototipagem rápida favorece enormemente os estudos de projeto porque permitem uma verificação do comportamento físico dos projetos e das possibilidades de construção.

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. Nesse sentido, a pesquisa foi conduzida com o horizonte de explorar a unicidade tecnológica que estes recursos de concepção e fabricação inauguram e não reproduzir técnicas progressas com mais agilidade ou economia.

O processo de fabricação por sobreposição de camadas, característico do tipo FDM de impressão 3D demonstra bons resultados em projetos com desperdício-zero de material desde que a estrutura a ser impressa não tenha barras com inclinações superiores a 45 graus em relação ao eixo vertical. Este foi um condicionante de projeto determinante para a concepção da estrutura celular em ambos os projetos realizados.

A modelagem paramétrica tem como principal potencialidade sua condição metaprocessual que registra em uma rede de interdependências todas as variáveis de um projeto arquitetônico, permitindo visualizar em tempo real as implicações gerais de uma alteração de valor específico. Essa condição amplia muito a capacidade de experimentação projetual em função da rápida visualização das possibilidades de arranjo morfológico. No entanto, a construção desta rede de interdependências demanda um tempo maior de dedicação nas etapas iniciais de projeto. Em *softwares*

como *Rhinoceros* e *Grasshopper* este processo é realizado por meio de uma interface de programação gráfica. O potencial metaprocessual foi explorado em ambos os projetos realizados que tiveram grande parte de suas variáveis parametrizadas e interrelacionadas como recurso para ampliar o campo de possibilidades combinatórias entre elas.

## **METODOLOGIA**

Os projetos partiram do pressuposto de que o processo de concepção paramétrico tem apresentado grande aplicação na geração de geometrias complexas (Florio, Wilson, 2011) permitido, por meio da definição e manipulação livre de variáveis (Tramontano, 2015), traçar estratégias viáveis para a produção de sólidos celulares. Pesquisas progressas (Naboni & Kunic, 2017), (Chérez, 2017), (Sachin, 2015) demonstraram, num contexto internacional de maior disponibilidade de recursos, grande viabilidade e aplicabilidade para os sólidos celulares na arquitetura.

Métodos tradicionais de criação de sólidos celulares utilizam, grosso modo, procedimentos químicos como adição de gás a compostos, permitindo produzi-los a partir de cerâmicas, cimento, polímeros, vidros e derivados de carbono. No entanto, no contexto nacional, poucas iniciativas articulam a produção de estruturas sólidas celulares com impressão 3D, seja FDM (*Fused Deposition Modelling*), SLA (*Stereolithography Apparatus*) ou SLS (*Selective Laser Sintering*). No contexto estrangeiro cabe destacar projetos de Naboni & Kunic (2017) – *Trabeculae Pavillion*; Abueidda et. Al (2017) – *University of Illinois*; Schaedler & Carter (2016) – *HRL Laboratories*; e Mamou-Mani (2020) – *Mamou-Mani Ltd.*

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*. 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

arquitetônica. Na impossibilidade de construção real das estruturas em escala arquitetônica, foram desenvolvidos projetos que especulavam suas aplicações para em diferentes situações. Os projetos levaram em conta questões de escala, proporção, funcionalidade e valor estético. Nesta pesquisa, os projetos não foram feitos no sentido de oferecer definições conclusivas, mas possibilidades de desenvolvimentos e aplicações futuras.

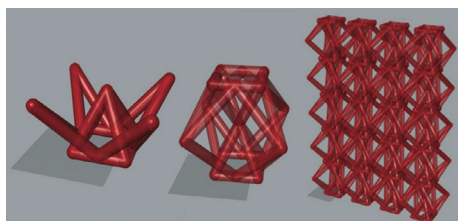
### PADRÃO DIAGRID – PROCEDIMENTOS

O padrão *diagrid* baseia-se em uma grade diagonal concebida a partir de estruturas triangulares modulares. Uma das principais vantagens é sua alta estabilidade estrutural combinada com a baixa quantidade de material (Moon, 2011). A ótima performance obtida em função da relação material versus estabilidade é fruto do complexo arranjo morfológico nas ligações entre as barras.

A etapa de conscientização deste procedimento identificou padrões triangulares semelhantes na natureza como os encontrados nos denticulos placóides dérmicos dos tubarões. Sua organização morfológica em grelha auxiliou a formalização do padrão *diagrid* desenvolvido. Estudos anteriores realizados por Wen et al. (2014) acerca dos placóides avaliaram estas complexas microestruturas de formato tridimensional e constataram inúmeras potencialidades funcionais como a resistência e a flexibilidade. De acordo com cada espécie de tubarão, as microestruturas e a distribuição dos denticulos variam, e isso cria uma gama de opções que podem ser aplicadas para o desenvolvimento dos sólidos celulares a partir de um conceito de combinação de escamas.

Para o desenvolvimento do projeto foram estabelecidas duas premissas de estruturação paramétrica: a) trabalhar com um arranjo morfológico de padrão triangular, distribuído espacialmente; b) respeitar inclinação máxima de 45 graus para viabilizar o processo de produção por impressão 3d sem necessidade de estruturas auxiliares e, consequentemente, sem geração de resíduos.

A unidade celular básica foi concebida como um prisma piramidal de base quadrangular em cujos pontos médios de suas arestas da base saem arestas diagonais interligadas posicionadas para se conectarem com uma outra célula superior espelhada (Fig. 01).

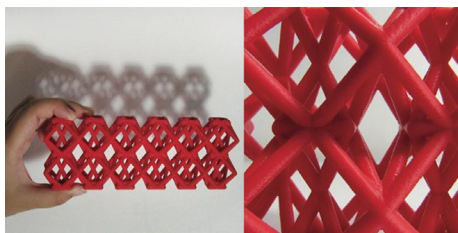


**Figura 01:** modelagem e simulação de arranjo morfológico em Diagrid (unidade básica, unidade espelhada e arranjo serial).  
Fonte: autores.

O resultado do espelhamento da célula inicial e posterior nos eixos horizontais e verticais resultou em uma estrutura celular aberta. Esse resultado foi submetido a testes de fabricação por impressão 3d para avaliar se a sobreposição das camadas ocorreria de forma eficiente

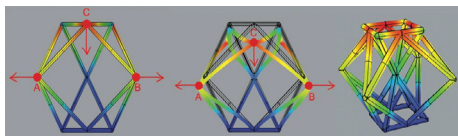
mesmo com muitas arestas inclinadas. A espessura das arestas foi também testada levando-se em consideração a resistência, o peso e facilidade de fabricação (Fig. 02).

Os principais parâmetros de configuração deste padrão celular foram: dimensões da célula, espessura das barras, ângulo de inclinação e quantidade de repetições.



**Figura 02:** Impressão 3d em PLA (Plastic / Polylactic Acid) do arranjo serial do modelo Diagrid. Fonte: autores

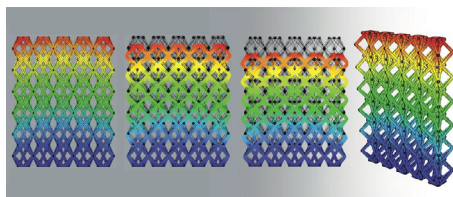
A regularidade morfológica do padrão *diagrid* permitiu um maior nível de controle no processo de fabricação e os erros comumente gerados em função da escolha pela não utilização de estruturas de suporte no processo de impressão 3d foram minimizados. Ainda na etapa de desenvolvimento, um outro ciclo de investigação implementado foi a simulação do desempenho da estrutura celular sob a aplicação de forças de tensão e compressão (Fig. 03). Para isso foi utilizado o *plugin Scan and Solve* para *Rhinoceros* cuja interface de entrada de dados solicita as seguintes informações: a) a geometria do sólido a ser testado, b) a identificação das faces que tocam o solo, c) o tipo de material de composição do sólido (polímero) e d) a potência das cargas que serão aplicadas.



**Figura 03:** simulação do comportamento estrutural sob efeito de carga em unidade celular – software *Rhinoceros* e *Scan and Solve*. Fonte: autores

Os resultados das cores correspondem à intensidade de deflexão (deformação) da geometria, sendo as cores frias (azuis e verdes) os pontos onde a deflexão é menor e as cores quentes (vermelho e amarelo) os pontos onde a deflexão é mais acentuada. O diagrama do centro na figura 03 ilustra a simulação de movimentação da estrutura sob esforço de uma carga vertical distribuída. A regularidade e simetria do padrão *diagrid* produziu deflexões mais homogêneas. Em testes realizados com barras mais grossas e mais finas o valor da deflexão foi alterado embora o padrão de movimentação dos pontos A, B e C tenha gerado a mesma distribuição de cores.

O mesmo padrão de deflexão encontrado nas células isoladas se faz presente num modelo simulado de sólido celular (Fig. 04): as estruturas da base se mostram mais rígidas à movimentação enquanto as superiores sofrem mais com as ações das forças de tensão.



**Figura 04:** simulação do comportamento estrutural sob efeito de carga em todo conjunto celular - software *Rhinoceros* e *Scan and Solve*. Fonte: autores

A etapa de aplicação da estrutura foi orientada pela ideia de utilização dos sólidos celulares na mesma posição em que foram realizados os testes, verticalmente, em sistemas de vedação, ou pelas arquitetônicas. As peles arquitetônicas (Fig. 05) são sistemas multifuncionais que podem atender demandas de ventilação e iluminação natural, estabilidade estrutural, economia de materiais e controle de privacidade.



**Figura 05:** simulação da aplicação de superfícies celulares padrão Diagrid em projetos de arquitetura. Fonte: autores

Em um contexto construtivo o sistema *diagrid* foi simulado como uma tipologia específica de cobogó aplicado como elemento de divisão espacial em grandes vãos de fachadas. Esta etapa de aplicação tem como objetivo fazer um uso arquitetônico dos artefatos desenvolvidos levando em consideração fundamentos básicos da composição de um projeto como coerência estrutural, conforto ambiental, princípios estéticos e economia de recursos.

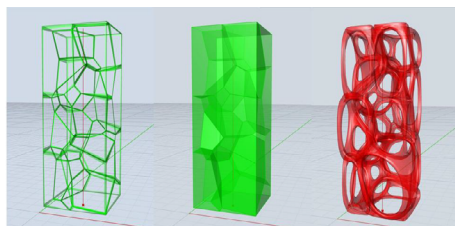
### PADRÃO VORONOI - PROCEDIMENTOS

Neste projeto, a etapa de conscientização realizou um levantamento mais direcionado sobre como produzir uma volumetria básica que pudesse ser subdividida internamente em células baseadas no padrão geométrico *Voronoi*. O *Voronoi* é um padrão fundamentalmente baseado na distribuição de pontos-chave e sua configuração morfológica tende para arranjos bastante irregulares, ao contrário do padrão anterior *diagrid*. É justamente esta característica de irregularidade na repetição dos desenhos celulares que desperta o interesse da comunidade projetual por causa de uma associação direta com formas da natureza.

A plataforma utilizada para operacionalizar a aplicação do padrão *Voronoi* foi o *Grasshopper* por oferecer recursos que atendiam a essa expectativa de criação de estruturas celulares não lineares de forma semiautomática e configurável. Apesar da irregularidade do padrão, o

processo de concepção demanda inicialmente de um sólido primitivo de base retangular que é usado como o limite de referência para a geração das células, como uma membrana externa de contenção. Dentro desta membrana é criada uma nuvem de pontos cuja disposição no espaço interno é, por definição, aleatória. Cada ponto dessa nuvem é o núcleo de uma célula cujo formato depende da relação de proximidade com o núcleo das células vizinhas. Cada célula tem a configuração de um poliedro irregular que tem suas faces compartilhadas com a célula vizinha. Nesta etapa, quanto maior o número de pontos mais densa é a divisão interna de células do bloco original.

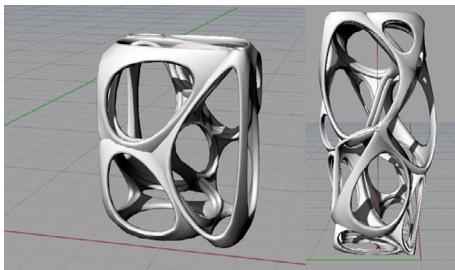
Considerando o objetivo de produzir um sistema estrutural aberto (vazado), composto apenas por pilares e vigas, as células foram decompostas criando-se uma estrutura aramada aos moldes de uma treliça espacial, mas com um arranjo não-linear. Em atendimento às limitações do processo de impressão 3d em fabricar estruturas com inclinação inferior a 45 graus em relação ao piso sem o uso de suportes auxiliares, houve necessidade de encontrar uma solução para as barras com estas características. Para viabilizar a construção sem suportes, foi adicionado recurso de suavização dos contornos das barras denominado *Weaver Bird* (Fig. 06). Este recurso cria curvas que suavizam as conexões entre as barras, aumentando a área de apoio para as camadas de impressão superiores. Em cada uma das barras do sistema estrutural foi definida uma variável de espessura para se estudar a densidade entre cheios e vazios. A etapa de conscientização gerou, ao final, uma programação paramétrica cujas variáveis eram: as dimensões da volumetria básica de referência, a quantidade de células internas e a espessura das barras estruturais.



**Figura 06:** simulação da aplicação do plugin Weaver Bird na morfologia Voronoi para suavização das conexões entre arestas. Fonte: autores

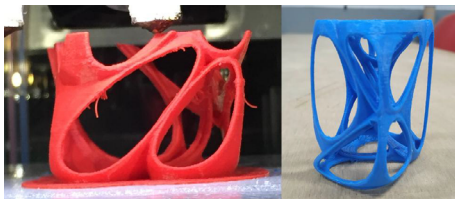
No processo de desenvolvimento foram selecionadas as duas morfologias representadas na Figura 07 e enviadas para software de fatiamento e preparo para a impressora 3d Cube Pro. A expectativa desta etapa era avaliar se as curvaturas geradas pelo *Weaver Bird* viabilizariam a produção de estruturas com angulações maiores do que 45 graus. Foi possível compreender que a morfologia Voronoi apresenta um nível de indeterminação na geração dos resultados e por esta razão não é possível antecipar totalmente o desenho da estrutura. Entretanto, uma avaliação preliminar visual dos arranjos gerados percebeu que as curvaturas cumpriram um efeito de mão-francesa para as arestas de referência. A figura 08 ilustra os dois testes de impressão realizados no desenvolvimento deste projeto.





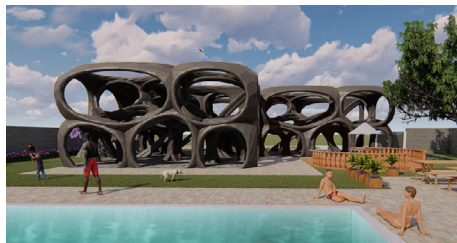
**Figura 07:** modelagens e simulações de arranjo morfológico padrão Voronoi (duas unidades com volumetrias-base diferentes). Fonte: autores

É possível perceber na figura 08 algumas poucas falhas isoladas no processo de impressão 3d, relacionadas à sobreposição das camadas, decorrentes do ângulo de inclinação reduzido das barras mesmo com a suavização de suas conexões. Outro aspecto que merece destaque é a extrema esbeltez das barras verticais em azul que, apesar de terem sido impressas sem falhas, se mostraram excessivamente frágeis em sua resistência à compressão e tração. Ao longo do desenvolvimento foram buscadas alternativas para superar as limitações de se ter necessariamente que trabalhar com formas de referência de base retangular ou quadrada e aumentar a complexidade de aplicação das divisões celulares. Uma solução encontrada e incorporada foi o recurso *twist* que rotaciona a geometria de referência em um determinado eixo a ser definido. O resultado sinaliza um primeiro esforço de independência do uso de sólidos celulares de volumes puros e regulares.



**Figura 08:** protótipos impressos em 3d. Fonte: autores.

Depois de finalizada as impressões dos primeiros protótipos impressos na etapa de desenvolvimento, deu-se início à etapa de estudos de aplicação dos códigos e configurações em situações de projeto de arquitetura. Foi realizado um estudo de projeto (Fig.09) para um sistema estrutural de edificação de dois pavimentos. A proposta teve como objetivo avaliar a escala e proporção de morfologias celulares tomando como referência a escala humana.



**Figura 09:** simulação em 3d renderizada de projeto de estrutura celular em escala arquitetônica. Fonte: autores

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em termos de resultado no processo de fabricação, o padrão diagrid é mais previsível que o padrão voronoi, sendo possível ter maior controle sobre os condicionantes de impressão e resultados. Por se tratar de uma estrutura celular baseada num padrão linear de repetição, a solução dos problemas locais é automaticamente aplicada para todo o conjunto. No padrão *voronoi*, não é possível adotar soluções padrão por não haver uma regularidade na repetição das unidades celulares. Neste caso, é necessário realizar uma avaliação e, se for o caso, uma correção pontual de problemas. Independentemente das diferenças estruturais entre os dois padrões ambos se mostraram viáveis para um processo de fabricação por impressão 3d em escala prototípica. O tempo de impressão é proporcional ao tamanho das peças, mas girou em torno de 2 horas para cada modelo, o que é considerado baixo para processos aditivos.

É importante reafirmar que uma mudança de escala de produção para estes padrões implicaria na emergência de um conjunto exponencial de novos condicionantes como é o caso dos aspectos relacionados à materialidade. A composição material dos protótipos apresentados está baseada em polímeros plásticos dotados de grande elasticidade, e isso contribui enormemente para que a impressão alcance resultados mais ousados, em termos estruturais, em comparação com um processo que adota ligas de cimento/areia/cerâmica em uma escala arquitetônica. Foi possível perceber que a elasticidade dos materiais de base polimérica tipo ABS e PLA viabilizaram a impressão de barras com inclinação inferior a 45 graus, uma vez que os fios não se rompem quando submetidos a uma situação sem apoio, permanecendo pendurados e, ao final, acabam enrijecendo e servindo de suporte para as camadas superiores. Esse tipo de procedimento “errado” já vem sendo até mesmo explorado em termos processuais pelos arquitetos que, propositalmente, criam uma espécie de renda de fios pendurados com resultados relevantes no uso da impressão 3d. Como não é este o caso dos padrões descritos aqui, sugerimos que os ângulos de mínimos de 45 graus sejam adotados como referência.

Levantamentos realizados com impressoras de edificações mostram a utilização frequente de materiais completamente distintos dos utilizados em impressoras FDM (*Fused Deposition Modeling*), como misturas de cimento, areia, fibras, cerâmica e agregados. Por se tratar de um processo de impressão a frio, há uma perda da capacidade elástica dos materiais. As próximas etapas da

pesquisa incluirão análises mais aprofundadas acerca da materialidade das construções impressas e alternativas técnicas para processos de impressão a frio. Um próximo passo para a pesquisa deveria considerar a utilização da impressora de cerâmica, cujo tamanho intermediário permitiria avançar nos estudos de peças maiores como pilares e conexões.

O uso de um sistema paramétrico para representar a inteligência de projeto para ambas as versões é crucial para sua viabilização, considerando a constante necessidade de ajustes nas configurações. No caso do padrão *voronoi* esses ajustes são ainda mais requeridos considerando que o algoritmo responsável por produzir e regular a distribuição das células está embarcado no *software Rhinoceros* utilizado. Isso significa que, o fato de a modelagem ser otimizada pelo *software*, que realiza autonomamente os cálculos necessários para executar o modelo, há uma necessidade constante de regular, configurar e ajustar o algoritmo para atender aos condicionantes exigidos. De forma contrária, o padrão *diagrid* não conta com recursos otimizados e toda sua concepção é feita passo-a-passo. Dessa forma, há mais liberdade para desenhar a sequência de funcionalidades e comandos para se obter o resultado desejado.

## CONCLUSÕES

A pesquisa demonstrou ser não apenas viável, mas também recomendado que a produção de morfologias complexas como os sólidos celulares ocorra por meio da associação dos sistemas paramétricos com os recursos de fabricação digital. As duas propostas de desenvolvimento apresentadas, padrões *diagrid* e *voronoi*, resultaram em protótipos com alto potencial de desenvolvimento em escalas maiores para atender a uma demanda futura de composição de sistemas estruturais na arquitetura. Em nenhum dos dois projetos apresentados houve uma utilização de material acima do necessário para a produção, sendo alcançado o objetivo desejado inicialmente. Além disso, a pesquisa produziu e documentou os códigos de concepção, controle e configuração dos modelos, podendo reutilizá-los em futuros projetos com a necessidade de poucos ajustes de adaptação. Espera-se que com uma futura disponibilidade de equipamentos de impressão 3d em escalas ampliadas seja possível conduzir as investigações descritas aqui para um cenário arquitetônico e estrutural de fato.

## AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos vão para a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo financiamento de projeto de pesquisa, à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PRPPG) pelas bolsas de Iniciação Científica, ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (Mestrado e Doutorado – PPGAU) pelo apoio científico, ao Departamento de Arquitetura e Urbanismo (DAU) pelo apoio na sessão das instalações físicas para o desenvolvimentos dos projetos, e a todos os membros do Grupo de Pesquisas Conexão VIX, inclusive aqueles que já se formaram, titularam e que, direta ou indiretamente, contribuíram com sua presença e participação nas atividades realizadas no laboratório.

## REFERÊNCIAS

- Abueidda, D. W., Bakir, M., Abu Al-Rub, R. K., Bergström, J. S., Sobh, N. A., Jasiuk, I. (2017). Mechanical properties of 3D printed polymeric cellular materials with triply periodic minimal surface architectures. *Materials & Design*, 122, 255-267, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.018>
- Ajdari, A. (2008). Mechanical Behavior of cellular structures: a finite element study. (Master Thesis) Department of Mechanical and Industrial Engineering, Northeastern University, Boston, Massachusetts.
- Bhate D. (2019). Four Questions in Cellular Material Design. *Materials* (Basel, Switzerland), 12(7), 1060. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/ma12071060>.
- Bueno, E. (2016). Diagramas de Voronoi. EM: BRAIDA, Frederico et al. (Orgs.). 101 conceitos de arquitetura e urbanismo na era digital. São Paulo: ProBooks.
- Chérrez, O. R. (2017). Diseño Paramétrico Generativo de Sólidos Celulares Funcionalmente Graduados. Graduation Work (Graduation work to obtaining the title of mechanical engineer) - Escuela Politécnica Nacional, Quito, Pichincha, 87 f.
- Erjavec, M. (2011). Mechanical properties of cellular materials. (online). Retrieved from: <https://www.yumpu.com/en/document/read/17852638/mechanical-properties-of-cellular-materials>. Acessado em 19mar2020
- Etymonline (2020). Tessellated. [online] Retrieved from: <https://www.etymonline.com/word/tessellated>. Access 08jul2020.
- Flores R. M. (2007). NET.LAB: ¿Algoritmo versus arquitectura? Diagrama de Voronoi como herramienta de diseño. *Revista de Arquitectura*, 13(16), 46-53. doi:10.5354/0719-5427.2013.28202.
- Gibson, L. J.; Ashby, M. F. (1999). *Cellular Solids: Structure and Properties*. 2o. ed. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 532 p.
- Leach N. (2017). Size Matters – why body architecture is the future of 3d printing. *Architectural Design*, 87(6), pp 76-83.
- Mamou-Mani, A. (2020). The Sandwaves. [online] Retrieved from: <https://mamou-mani.com/project/the-sandwaves/>.
- Moon, K. S. (2011). Diagrid structures for complex-shaped tall buildings. *Procedia Engineering*, 14, 1343-1350.
- Naboni, R.; Kunic, A. (2017). Design and Additive Manufacturing of Lattice-based Cellular Solids at Building Scale. SIGRADI, CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBERO-AMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 2017, Concepción, Chile. Conference paper. Retrieved from: <https://www.researchgate.net/publication/321234750>.
- Ozkil, A. (2017). Collective design in 3D printing: A large scale empirical study of designs, designers and evolution. Design Studies. 2017. Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark. Retrieved from: [https://www.researchgate.net/publication/316950506\\_Collective\\_design\\_in\\_3D\\_printing\\_A\\_large\\_scale\\_empirical\\_study\\_of\\_designs\\_designers\\_and\\_evolution](https://www.researchgate.net/publication/316950506_Collective_design_in_3D_printing_A_large_scale_empirical_study_of_designs_designers_and_evolution).
- Sachin, J. (2015). Additive Manufacturing and Stress Analysis of Naturally and Artificially Obtained Cellular Structures. Thesis (Master of science in mechanical engineering) - University of Texas at Arlington. Arlington, Texas.
- Sakin M. K.; Caner, Y. K. (2017). 3d Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. *Energy Procedia*, 134, 7, 702-711. Retrieved from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217346969>.

- Schaedler, T. A., Carter, W. B. (2016). Architected Cellular Materials. *Annual Review of Materials Research*, 46, 187-210.
- Speaks, M. (2002). *Inteligência de Projeto*. In: Sykes, K. (Ed.). *O campo ampliado da arquitetura: antologia teórica 1993-2009*. São Paulo: Cosac Naify. 156-164.
- Subrin, K.; Bressac, T. Garnier, S.; Ambiehl, A.; Paquet, E.; Furet, B. (2018). Improvement of the mobile robot location dedicated for habitable house construction by 3D printing. *IFAC-Papers Online*, 51, I. 11, 716-721. Retrieved from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318315295>.

