

## Concepção e Fabricação de Estruturas Sólidas Celulares Através da Impressão 3D e Seu Uso na Arquitetura

### Identificação:

Grande área do CNPq.: Ciências Sociais Aplicadas

Área do CNPq: Arquitetura e Urbanismo

Título do Projeto: Concepção e Fabricação de Estruturas Sólidas celulares através da impressão 3D e seu uso na arquitetura

Professor Orientador: Bruno Massara Rocha

Estudante PIBIC/PIVIC: Ygor Facco Steiner

**Resumo:** *A fabricação digital e a capacidade de transformar modelos digitais em formas físicas garantem tanto o aumento da complexidade destas formas, como o aumento da velocidade de produção (HANNA & TURNER, 2006). É, portanto, papel da arquitetura acompanhar os avanços tecnológicos e aplicá-los em seus métodos para obter maior eficiência. E a criação de uma estrutura celular passa tanto pelo processo de modelagem paramétrica, na concepção formal da estrutura, como também pela fabricação digital para a representação física de protótipos das estruturas criadas.*

*A pesquisa, portanto, buscou integrar estes avanços tecnológicos com a prática de projetar arquitetura e usar recursos como a parametrização a fim de desenvolver uma nova forma de se projetar., pensando no papel desempenhado dentro do contexto arquitetônico tanto pelas estruturas celulares, como pela própria forma de concepção dessas estruturas.*

*Desta forma foi possível o desenvolvimento de protótipos impressos, de um código generativo complexo que cria e modifica as estruturas celulares criadas por ele, bem como a realização de um workshop que atuou na divulgação desses métodos para alunos de graduação.*

**Palavras chave:** *sólidos celulares, impressão 3D, código generativo, arquitetura paramétrica*

### 1 – Introdução:

A arquitetura tanto já fez, como vem fazendo uso de diversos avanços tecnológicos, principalmente na área da computação, a fim de modificar essencialmente a forma de se projetar. Hoje é comum vermos arquitetos utilizando softwares como AutoCad, Sketchup, e até os mais recentes que utilizam tecnologia BIM, como o Revit e ArchiCad, para desenvolver projetos que se encontram nos mais diversos estágios. Sejam para detalhamentos ou estudos preliminares, a grande maioria dos escritórios de arquitetura hoje utilizam diversos softwares ao longo de todo o processo de projeto. Esta pesquisa tem a finalidade de possibilitar um contato ainda maior da arquitetura com a computação, usando linguagem de programação

gráfica para gerar estruturas que, eventualmente, podem ser utilizadas nos mais diversos contextos dentro da arquitetura.

A parametrização é o processo de definição de variáveis e condicionantes de projeção utilizados para a construção de uma forma geométrica (TRAMONTANO, 2015). A parametrização é uma forma de se projetar inovadora que auxilia na investigação de novas morfologias projetuais como é o caso dos sólidos celulares (GIBSON, ASHBY, 1999). E associada com linguagens de programação gráfica, é capaz de desenvolver um código generativo que pode, por sua vez, gerar incontáveis variações desses formas geométricas em pouquíssimo tempo.

Com a fabricação digital, neste caso por meio da impressão 3D, tem se tornado possível criar representações físicas complexas dos objetos projetados que auxiliam de forma fundamental a completa compreensão do espaço projetado (FLORIO, 2011). A impressão 3D também fez parte da pesquisa durante todo o processo de estudo dos resultados obtidos com o código generativo. Autores como Naboni & Kunic (2017) comentam que os sólidos celulares são capazes de oferecer otimização na fabricação de peças fora do canteiro de obras, na utilização de materiais e outras possibilidades positivas para a arquitetura. É possível afirmar que através dos materiais celulares, é possível alcançar estruturas mais leves e tão resistentes quanto aquelas constituídas de materiais sólidos (ibid.).

## 2 – Objetivos

Aproximar a arquitetura e seus métodos de projetos de outras tecnologias como a parametrização, atingida através de uma linguagem de programação, e a fabricação digital, praticada com a impressão 3D. A ideia é fazer com que a arquitetura esteja cada vez mais integrada com as mais diversas formas de tecnologia digital em todos os estágios do processo de projeto, seja ele na concepção, onde a parametrização com o desenvolvimento de um código vão atuar, ou mesmo na fabricação de protótipos, o que é possibilitado pela fabricação digital e impressão 3D.

### 2.1 - Objetivos Específicos:

- Investigar a viabilidade de estruturas celulares dentro do contexto arquitetônico e as relações entre eles.
- Esclarecer os conceitos relacionados às temáticas da pesquisa.
- Desenvolver habilidades nos softwares utilizados na pesquisa. (*Grasshopper, Rhinoceros, Repetier, CubePro*)
- Promover a integração da arquitetura com novas formas de tecnologia e fabricação digital
- Democratizar o conhecimento sobre programação gráfica dentro da comunidade acadêmica de arquitetura a partir de softwares generativos.
- Desenvolver estudos de caso para exemplificar as diversas utilizações possíveis tanto das estruturas celulares como do método de projeto paramétrico dentro do contexto arquitetônico

### 3 – Metodologia

A pesquisa teve seu desenvolvimento dividido em 5 etapas. Durante o processo foram utilizados diversos métodos como a pesquisa bibliográfica, a investigação experimental utilizando softwares paramétricos e impressoras 3D, aplicação e análise dos resultados aplicados no contexto desejado. As etapas podem ser apresentadas como:

- A. Introdução teórica à temática.
- B. Desenvolvimento e aprimoramento dos códigos generativos da pesquisa.
- C. Impressão e análise dos protótipos impressos.
- D. Investigação sobre a viabilidade das estruturas celulares dentro do contexto arquitetônico.
- E. Workshop para aplicação e análises dos resultados em contexto de projeto.

#### **A - Introdução teórica à temática:**

Na primeira etapa da pesquisa foi realizada uma pesquisa bibliográfica a fim de definir e esclarecer todos os conceitos presentes na temática de arquitetura paramétrica e de estruturas celulares trabalhadas. Foram consultados ao longo deste processo diversos autores (NABONI, KUNIC, 2017), (TRAMONTANO, 2015), (FLORIO, 2011), (CHIARELLA, 2004) que expõem e analisam estes conceitos partindo de diversos pontos de vista, mas sempre tendo a realidade e o contexto arquitetônico como base das análises.

Tramontano (2015), por exemplo, além de definir o processo de parametrização como um processo de definição de parâmetros e de seus valores na construção de uma forma geométrica, chama a atenção para uma confusão comum no meio dos estudantes de arquitetura, que se dá entre o conceito de parametrização e o das geometrias complexas. Segundo Tramontano, os alunos tendem a não ter claramente definida a diferença entre esses dois conceitos, o que acontece pelo fato serem conceitos recentes dentro do estudo de arquitetura. Acredita-se que parte desta confusão também seja pela íntima relação que a arquitetura paramétrica tem com as formas complexas, sendo assim, estudantes não introduzidos a eles separadamente tendem a uní-los como se fosse uma coisa só. Conclui-se, portanto, que é preciso que haja um esclarecimento da diferença existente entre esses dois conceitos, que é o que pretende fazer esta pesquisa.

Tanto Tramontano (2015) como Florio (2011), baseiam seus artigos em experiências com alunos de arquitetura, aplicando os conceitos de parametrização em disciplinas de projeto, como Florio (2011), e em workshops, como Tramontano (2015). Essa abordagem experimental dos autores, na qual eles escrevem sobre a experiência de apresentar os conceitos de parametrização e fabricação digital para alunos de arquitetura, torna possível concluir que, de fato estamos tratando de um assunto que vem

ganhando importância e, conseqüentemente, demandando mais estudos dentro da comunidade acadêmica de arquitetura.

Florio (2011) aborda logo no início de seu artigo um dilema antigo dentro de áreas tão multidisciplinares como a arquitetura. Ele fala da constante necessidade de se inserir novos conteúdos e novas tecnologias ao curso e de como isso pode fragmentar o ensino, tornando o curso desconexo, quando, na verdade, a ideia é que as novas tecnologias somem ao conhecimento do profissional de arquitetura e façam dele um profissional mais completo. Ele também a fabricação digital como um bom exemplo de integração de novas tecnologias ao contexto arquitetônico, a partir da impressão 3d e do corte a laser, explicando como que a facilidade em gerar protótipos aproxima os alunos dos conhecimentos práticos geométricos, isto é as habilidades de se projetar em 3 dimensões. Já que, segundo ele, as maquetes físicas ainda são de grande relevância no processo de projeto na maioria dos grandes escritórios de arquitetura.

É importante também mencionar o trabalho de Chiarella (2004), em seu artigo ele estuda as influências da incorporação de superfícies paramétricas e das entidades de spline, ou também, as NURBS (Non Uniform Rational Beta Splines), na arquitetura. Segundo ele, essa incorporação acabou influenciando na criação de novos recursos de produção gráfica e de design para o campo da arquitetura. Chiarella (2004) ainda aponta como uma das maiores contribuições dessa incorporação a possibilidade de se manipular e operar estas formas complexas de maneira mais intuitiva, possibilitando assim repensar mudanças na fase inicial de projeto.

Enfim, estes são alguns exemplos dos autores que foram consultados durante esta primeira etapa da pesquisa. A intenção foi demonstrar a base acadêmica da pesquisa, expor alguns dos conceitos mais gerais a respeito dos temas e demonstrar a importância de se estudar esses conceitos dentro da arquitetura e, principalmente, dentro da academia.

#### **B - Desenvolvimento e aprimoramento dos códigos generativos da pesquisa:**

Depois de realizar a introdução teórica ao tema que envolvia, além do processo de parametrização da arquitetura, a fabricação digital e o seu impacto no meio acadêmico da arquitetura, era hora de pôr em prática os conceitos assimilados. Desenvolvendo, assim, um código generativo que fosse capaz de conceber, parametricamente, estruturas celulares que seguissem um padrão previamente definido.

O código foi desenvolvido no *Grasshopper*, um software que possibilita a elaboração de códigos a partir de uma interface gráfica, sem a necessidade de escrevê-lo em linhas. O *Grasshopper* também foi utilizado por Florio (2011) e Tramontano (2015) em suas respectivas pesquisas. O *Grasshopper* é utilizado juntamente com o *Rhinoceros*, um software de modelagem 3D. Quando utilizados juntos o *Rhinoceros* atua como um visualizador do código generativo que é elaborado no *Grasshopper*.

Concluindo, os dois softwares são utilizados paralelamente, o *Grasshopper* para desenvolver e manipular o código e o *Rhinoceros* para visualizar uma prévia do que está sendo gerado pelo *Grasshopper*.

O código durante todo o processo de desenvolvimento manteve algumas características essenciais que definiam toda a ideia por trás das estruturas celulares que eram geradas e a maior delas, com certeza, é o Voronoi. O Voronoi é um recurso do *Grasshopper* que é capaz de subdividir um paralelepípedo a partir uma série de pontos que estejam contidos neste polígono. O grande ponto a respeito do voronoi é que as subdivisões que ele cria lembram arranjos vistos em alguns grupos de células, dando a estrutura um caráter estético muito próprio. Dito isto, é possível afirmar que o fundamento deste código generativo consiste em encontrar diferentes variações para os arranjos dos pontos e, conseqüentemente, das células criadas pelo voronoi e, assim, conseguir criar uma série de diversas estruturas celulares com a mesma identidade, porém variando em dimensão, arranjo e quantidade de células que a formam.

O código inicialmente (Figura 1) consistia na criação de uma estrutura tubular. O Voronoi gera as células como poliedros e parte do código era responsável por transformar as arestas dos poliedros em tubos com uma espessura única definida. Essa primeira versão do código generativo consistia na criação de uma caixa, ou paralelepípedo, de dimensões variáveis, onde nela eram dispostos diversos pontos. Era possível controlar a quantidade de pontos, entretanto a posição de cada ponto era gerada randomicamente por um recurso do *Grasshopper* que era capaz de gerar inúmeras variações da disposição desses pontos. Depois de ter os pontos dentro da caixa, aplica-se o Voronoi que, por sua vez, cria as células que formam a estrutura. Por fim dava-se dimensão às linhas das arestas, fazendo com que se originassem os tubos que constituíam as estruturas nesta etapa.

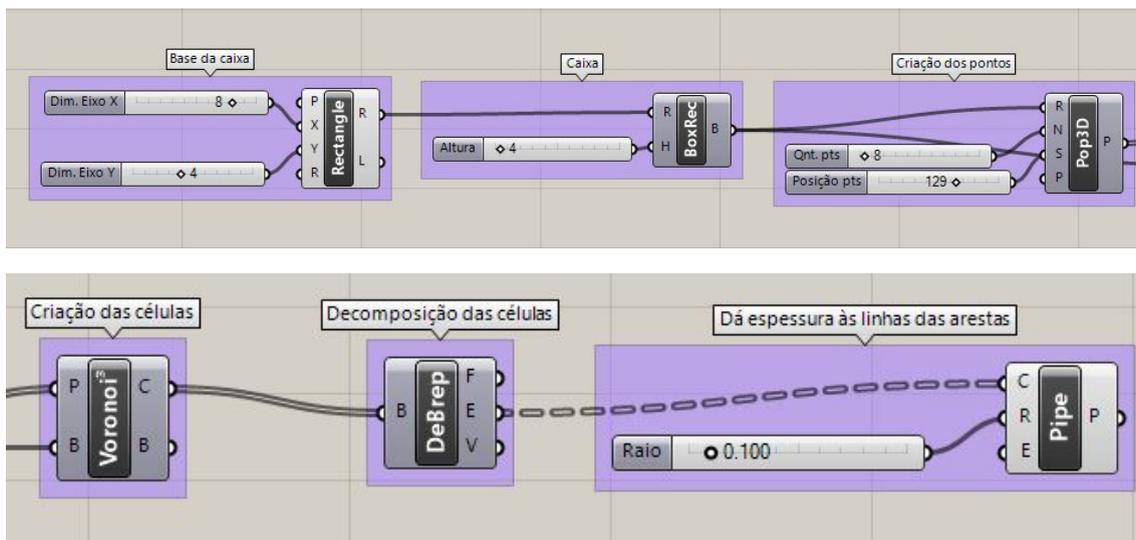


Figura 1. Código principal desenvolvido em *Grasshopper* (a) primeira parte do código (b) segunda parte.

Fonte: autoria própria.

Esta primeira versão já cumpria um dos principais objetivos desejados para o código generativo, que era o de possibilitar a criação de estruturas que pudessem variar nas suas dimensões gerais e no arranjo interno das células. Entretanto, as estruturas neste estágio foram consideradas objetos impróprios para a impressão. Era sim possível imprimir as peças como estavam, porém a técnica de impressão utilizada durante a pesquisa, que consiste na impressão de camadas horizontais de baixo para cima, apresenta dificuldades em imprimir qualquer haste que tenha uma inclinação inferior a 45 graus, visto que, nestes casos, o filamento depositado acaba por ceder (Figura 2). A solução encontrada foi aplicar um *plug-in* que suavizou o encontro entre as arestas das células, criando curvas e facilitando o processo de depósito do filamento pela impressora.



Figura 2. Exemplo de impressão na qual houve o decaimento do filamento, já com a aplicação do *plug-in*.  
Fonte: Autoria própria.

O *plug-in* utilizado foi o *Weaverbird*, ele foi o responsável não só por facilitar e tornar o processo de impressão dos protótipos mais viável, mas também por dar toda a identidade estética que foi adotada para as estruturas até o final da pesquisa. Posteriormente, a fim de explorarmos outras formas que não fosse a caixa, exigida pelo Voronoi, foi aplicado um outro recurso do *Grasshopper* que tornava possível uma operação de rotação de uma das extremidades da caixa em torno do próprio eixo, possibilitando ainda mais variações estéticas das estruturas. Já com o código atualizado com o *Weaverbird*, foi possível dar início a fase de testes e impressão de protótipos.

#### **D - Impressão e análise dos protótipos impressos:**

Depois de ajustar o código para que ele gerasse estruturas mais viáveis à impressão foram gerados duas séries de estruturas celulares a partir das variações internas do arranjo de células. Os experimentos foram numerados na ordem de produção, os experimentos de 01 a 05 são experimentos que não apresentam a rotação de uma das bases, já os numerados de 11 a 15 são os que apresentam essa característica, entretanto nem todos foram selecionados para a impressão.

O primeiro protótipo impresso foi o Experimento 01 (Figura 3), a sua estrutura é composta de 10 células, o que resultou em uma estrutura mais robusta, já que o *Weaverbird* cria as curvas a partir dos encontros entre as arestas das células, ou seja, quanto mais arestas distribuídas num mesmo espaço, mais

volumosa será a estrutura. Por conta disso, foi percebido, ao final da impressão, que o excesso de filamento depositado para dar forma ao protótipo acabou causando um decaimento maior do que o esperado em alguns pontos da estrutura.

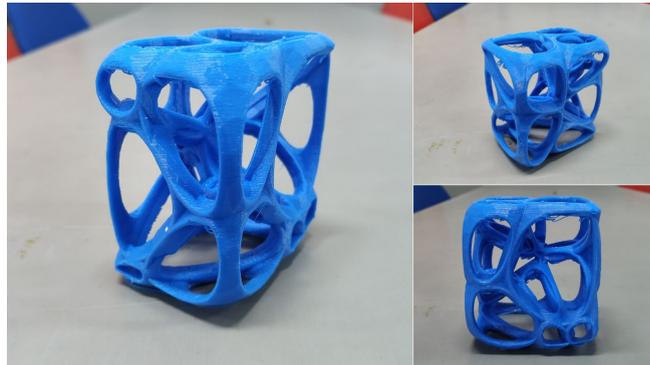


Figura 3. Protótipo impresso do experimento 01. Fonte: Acervo pessoal.

Em contrapartida, o Experimento 03 (Figura 04), segundo protótipo impresso, já possui uma estrutura muito mais afilada. Com a caixa mantendo as mesmas proporções e com um número consideravelmente menor de células, seis. O Experimento 04 teve um resultado mais interessante do que o protótipo anterior em um determinado aspecto. Devido ao fato da estrutura ser mais delicada, o decaimento de filamento foi bem menor e mais discreto do que no protótipo anterior. Entretanto uma das hastes da estrutura, a maior delas, acabou quebrando depois da impressão justamente devido a esta delicadeza. Isso chama a atenção para que se busque um certo equilíbrio entre as dimensões da estrutura, a qualidade da impressão e a proposta estética desejada, pelo menos nos casos em que se pretende imprimir as estruturas geradas pelo código.

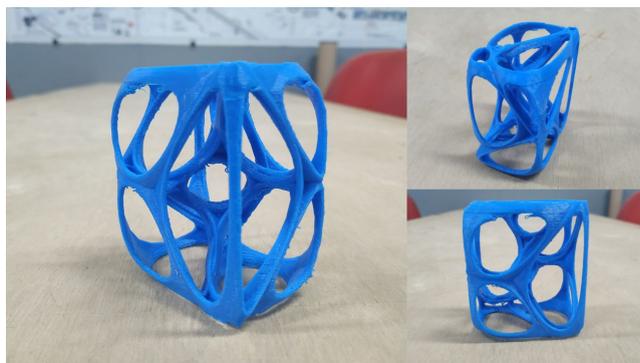


Figura 4. Protótipo impresso do experimento 03. Fonte: Acervo pessoal.

O terceiro protótipo impresso durante a pesquisa foi o Experimento 12, nele foi aplicado recurso do *Grasshopper* responsável por rotacionar uma das bases da estrutura em torno de seu próprio eixo. Isto foi feito na intenção de desenvolver estruturas que fugissem um pouco da imagem geral de caixa à qual o Voronoi nos limita, dando a estrutura uma nova característica morfológica. Surpreendentemente, ao

contrário do que se imaginava antes de realizar a impressão, o resultado foi bem positivo, provavelmente a peça com melhor qualidade de impressão. Os decaimentos de filamento ainda estavam presentes, mas em bem menos quantidade e intensidade.

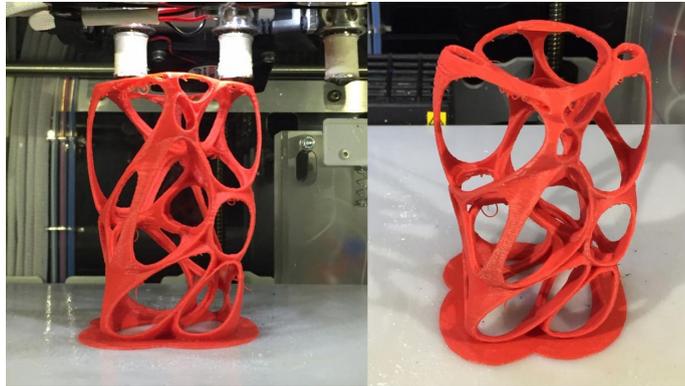


Figura 5. Protótipo impresso do experimento 12. Fonte: Acervo Pessoal

É importante mencionar que todas essas impressões até aqui foram feitas com as mesmas configurações de impressão, o que quer dizer que a qualidade de nenhuma delas foi influenciada por uma possível alteração na resolução, preenchimento, densidade de camadas ou material utilizado. Este cuidado foi tomado justamente para ser possível analisar a qualidade da impressão tendo como variável apenas a forma da estrutura impressa. Concluindo, é possível afirmar que existe uma relação entre a quantidade de células presentes numa estrutura de mesmas dimensões externas e a robustez da mesma estrutura, e que esta relação influencia diretamente na resistência do objeto impresso. O objeto com maior densidade de células vai apresentar uma maior robustez, logo maior resistência, entretanto estes casos tendem a apresentar maior decaimento de filamentos. Ao passo que os objetos com menor densidade de células tendem a apresentar uma estrutura mais delgada e delicada, resultando numa impressão mais limpa, com menos decaimento de filamento, porém de resistência inferior resultando inclusive na quebra de uma das peças, o protótipo do Experimento 04.

#### **E - Investigação sobre a viabilidade das estruturas celulares dentro do contexto arquitetônico:**

Com os protótipos impressos em mãos, restava pensar a respeito de que forma aquelas estruturas poderiam ser inseridas no contexto arquitetônico, qual seria a aplicação delas dentro do mercado de arquitetura, visto que, até então, eram apenas objetos impressos em 3d sem identidade; eram objetos de estudo, resultados de um código generativo. Durante esta etapa, foram criadas algumas imagens com a função de ilustrar como as estruturas funcionariam nos diferentes contextos (Figura 6).



(a)

(b)

Figura 6. Imagens criadas a fim de ilustrar possíveis aplicações dos sólidos celulares na arquitetura (a) proposta conceitual de habitação (b) proposta de monumento em parque público. Fonte: Autoria própria.

Inicialmente foram pensadas em três diferentes abordagens para a aplicação prática das estruturas na área da arquitetura. A primeira delas foi a de pensar as estruturas como elementos arquitetônicos, sejam eles funcionais ou simplesmente ornamentais. Na busca por referências do uso de estruturas celulares similares às produzidas na pesquisa nesta abordagem de elementos arquitetônicos, foi encontrado um perfil na rede social Instagram relacionado ao design de interiores chamado Studio Conceitual. Neste perfil encontramos aplicações de estruturas muito similares aos sólidos celulares celulares como elementos de arquitetura (Figura 7).

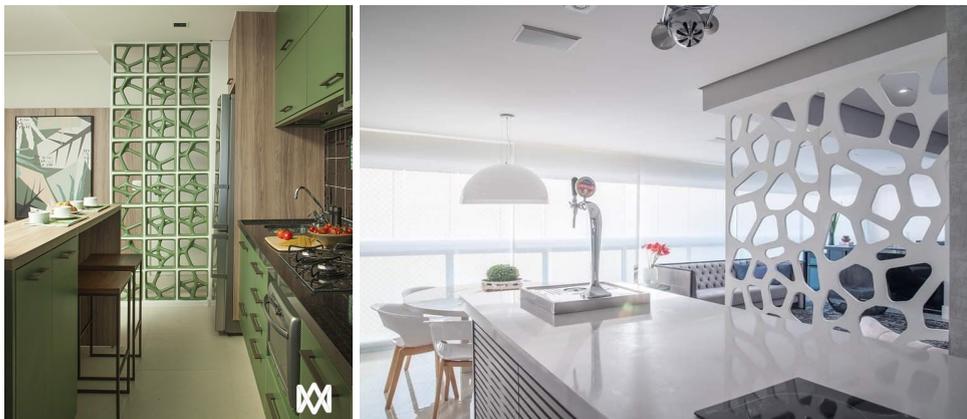


Figura 7. Exemplos de aplicações de sólidos e estruturas celulares. Fonte: Página do Studio Conceitual no Instagram. Disponível em: <<http://www.instagram.com/studioconceitual>> Acesso em. 09. out. 2020.

A segunda abordagem considerada foi a da utilização das estruturas num contexto mais artístico, considerando a criação de monumentos e esculturas para os mais diversos ambientes, desde um parque público, até o hall de um hotel, ou mesmo um museu. O objetivo da pesquisa não é definir arte, mas ao levantar a hipótese de tal uso para as estruturas celulares, a discussão surge inevitavelmente. Enfim, nossos esforços se concentram em evidenciar a possível ascensão de uma nova forma de se fazer arte que pode mudar a forma como nós a compreendemos.

A última e talvez mais importante abordagem da pesquisa foi a do emprego das estruturas no processo de desenvolvimento de um projeto arquitetônico. O mais interessante a respeito dessa abordagem é que ela não estuda somente as estruturas em si, mas também o processo de criação das estruturas a partir da elaboração do código paramétrico e analisa a possibilidade da atuação desses dois fatores no desenvolvimento de um projeto de arquitetura.

A utilização de softwares de programação como o *Grasshopper* nos processos de projeto de arquitetura já vem sendo estudada em diversos campos. Sejam no estudos de morfologia ou estudos funcionais como distribuição de espaço entre os cômodos ou setores de um projeto, ou os relacionados ao conforto ambiental. Pesquisas de todo o tipo têm a intenção de aproximar a arquitetura dessas áreas computacionais, criando um novo modo de projetar.

Durante a pesquisa foi determinado que as estruturas celulares, resultadas dos códigos generativos, tem a mesma condição de atuar no desenvolvimento de um projeto arquitetônico. A ideia é que as estruturas concebidas sirvam como conceito morfológico para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos. É importante destacar que o fundamento desta proposta é que o arquiteto comece a projetar utilizando como referência um sólido celular gerado parametricamente. Assim é possível inserir o fator paramétrico ao projeto, mas não elimina e nem reduz a importância da atuação do profissional de arquitetura.

Dito isto conclui-se que a utilização da programação paramétrica é uma realidade já próxima para a arquitetura e a fomentação desse tipo de conteúdo dentro da academia, principalmente nos cursos de graduação se faz a cada dia mais necessária. E foi acreditando nisso que foi decidida a realização de um Workshop com a intenção de divulgar para alunos da graduação este novo método de projeto e buscar resultados que aproximasse a ideia de se desenvolver projetos a partir das estruturas celulares da realidade.

#### **F - Workshop para aplicação e análises dos resultados em contexto de projeto.**

A ideia do Workshop veio com dois objetivos fundamentais. O primeiro de divulgação desse novo método de fazer arquitetura e de projetar na academia. O segundo foi o de pôr em prática, com os participantes do Workshop, a ideia de se fazer projeto utilizando o código gerado na pesquisa e, assim, avaliar os resultados obtidos por eles e ponderar o quão próxima da realidade está essa ideia.

O Workshop possuía um objetivo prático de que cada aluno chegasse ao final do curso com uma estrutura celular, e que ele tivesse explorado as potencialidades da estrutura para fazer com que ela chegasse o mais próximo possível de um projeto de arquitetura. Toda a concepção do Workshop gira em

torno de transformar a estrutura celular que o aluno obtinha a partir do código generativo em algo que pudesse ser potencialmente visto como um projeto arquitetônico. Para isso, durante o workshop, foram sendo desenvolvidas outras sequências de códigos que foram sendo acrescentadas ao código original.

O Workshop foi constituído de uma primeira etapa expositiva, que se deu no primeiro encontro, na qual foram feitas apresentações dos resultados parciais das pesquisas de IC realizadas no Conexão VIX. Projetos como o da colega Luisa Franklin, que fez um levantamento de diversos projetos que foram executados através das técnicas de impressão 3D. Pretendia-se trabalhar, nos encontros subsequentes, com uma metodologia que consistia na alternância entre aulas expositivas, onde eram demonstradas as progressões do código que estavam sendo desenvolvidas, e aulas para que os alunos pudessem tirar suas dúvidas a respeito do código.

Foi feita, primeiramente, juntamente com o professor orientador Bruno Massara uma apresentação da versão original do código. Entretanto constatou-se que para os alunos poderem trabalhar melhor o conceito de um projeto arquitetônico, mais especificamente, o conceito de uma habitação, tendo como base os sólidos celulares gerados parametricamente, havia a necessidade de aprimorar o código para que os alunos pudessem, modificar estas estruturas posteriormente. Quando se trabalha com *Grasshopper* juntamente com o *Rhinoceros*, é possível editar o resultado do código manualmente dentro do *Rhino* posteriormente, entretanto, desta forma, perde-se o caráter paramétrico do processo, logo, como a intenção do Workshop era apresentar aos alunos recursos de arquitetura paramétrica, optou-se por desenvolver adições ao código que eram capazes de fazer essas modificações da estrutura de dentro da interface do próprio *Grasshopper*. Sendo assim, o período do Workshop, foi um período onde o código generativo das estruturas celulares alcançou um novo nível de complexidade.

O *Grasshopper* interpreta as células do Voronoi como sendo poliedros isolados, logo, decompondo esses poliedros em faces, arestas e pontos, dentro do *Grasshopper*, criam-se muitas possibilidades de modelagem. Neste período foram acrescentadas ao código a função de remover uma quantidade determinada de células do conjunto inicial que formava a estrutura (Figura 8), o que, finalmente, possibilitou a obtenção de resultados que se distanciaram bastante do formato geral retangular obtidos inicialmente. Também foram acrescentadas ao código funções que foram julgadas necessárias para a melhor representação dos projetos, como a adição das faces das células nos sólidos celulares, a aplicação do voronoi nessas faces, a remoção de arestas específicas, dentre outras.

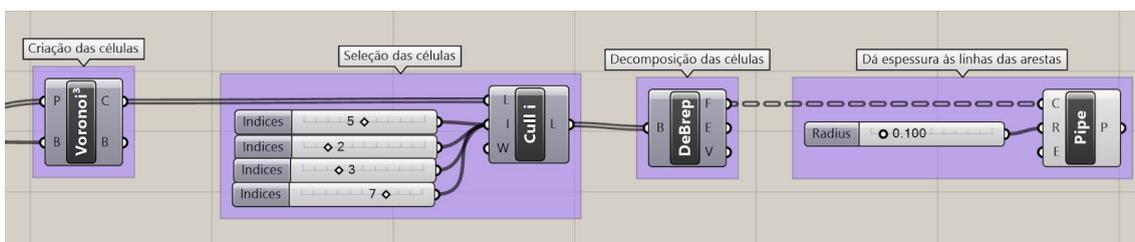


Figura 8. Uma das sequências de código desenvolvidas durante o Workshop com a finalidade de selecionar uma quantidade limitada de células para constituírem o sólido final. Fonte: Autoria própria.

Com as linhas de código adicionais, os alunos foram capazes de criar estruturas que atenderam às expectativas no que diz respeito a criar relação com um projeto arquitetônico (Figura 9). Considerando que objetivo do Workshop não era, necessariamente, o de criar projetos arquitetônicos de fato, mas sim o de criar possíveis conceitos para eles. E sim, houveram resultados surpreendentemente positivos. A engenharia e a tecnologia construtiva já dão conta de construir de maneira segura diversos projetos com formas absolutamente complexas, sendo assim, não há mais motivo para crer que as estruturas celulares geradas parametricamente no decorrer da pesquisa são uma exceção para isso.

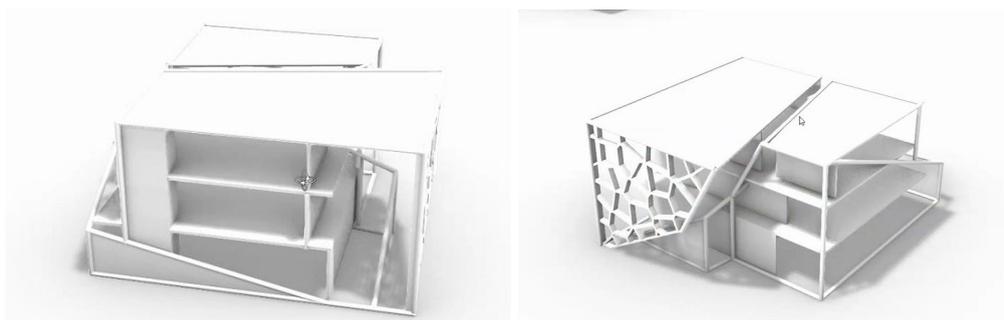


Figura 9. Conceito de residência elaborado durante o Workshop pela aluna Luisa Gutierrez. Fonte: Acervo Pessoal

#### 4 – Resultados

Os resultados da pesquisa podem ser divididos entre materiais e digitais, onde os materiais representam as impressões 3D realizadas ao longo do desenvolvimento da pesquisa e os resultados digitais toda a amostragem de estruturas criadas com o código durante a pesquisa e também durante o Workshop. Cada uma contribui de maneira diferente para as conclusões que podem ser tiradas a partir do que foi desenvolvido durante o último ano.

Os resultados materiais, as impressões em 3D (podem ser visualizadas nas Figuras 3, 4 e 5), representavam o objetivo inicial da pesquisa. O código que havia sido desenvolvido pela colega Sara Lauwers em um PIBIC anterior precisava ser aperfeiçoado a fim justamente de facilitar o processo de impressão das estruturas pelos equipamentos do laboratório. De modo geral os resultados foram bem satisfatórios, as impressões ficaram com boa qualidade e não houve nenhum problema com as máquinas, inclusive foi possível analisar a relação de parâmetros do código com a resistência da estrutura, assumindo que quanto maior a quantidade de células em função das dimensões gerais da caixa, mais robusta e, conseqüentemente, mais resistente será a estrutura.

Já os resultados digitais, por sua vez, são mais múltiplos. Desde os primeiros experimentos gerados com as primeiras modificações no código (Figura 10), já houveram resultados. Estes primeiros experimentos, com a adição do *Weaverbird*, serviram não só para ditar qual seria a estética adotada durante o restante da pesquisa, mas também para possibilitar os testes de impressão. O workshop também foi responsável por bons resultados na mídia digital. As imagens e estruturas criadas pelos alunos (Figura 11) são os resultados que resumem mais consistentemente a ideia da pesquisa de modo geral, pois aplicam o conceito da estruturas celulares no contexto do projeto arquitetônico. Os resultados obtidos pelos alunos do workshop pode ser visto como o resultado final da pesquisa, o que melhor define o que foi feito e estudado ao longo de seu desenvolvimento.

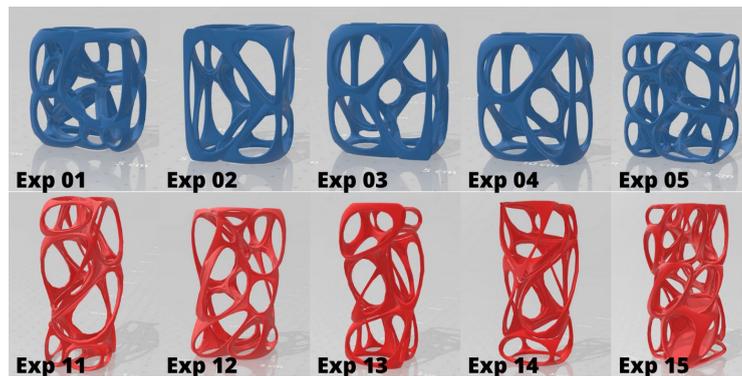


Figura 10. Todos os experimentos desenvolvidos durante a pesquisa (nem todos foram impressos) Fonte: Autoria própria

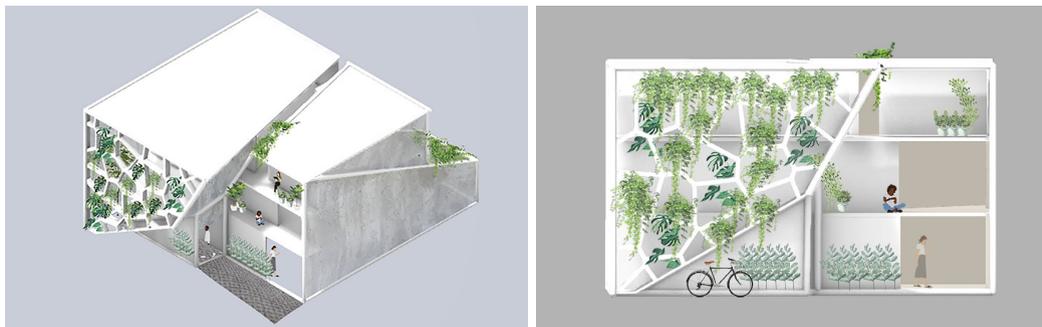


Figura 11. Conceito desenvolvido e pós-produzido no Workshop pela aluna Luisa Gutierrez. Fonte: Luisa Gutierrez (2020)

Além desses resultados mais práticos, divididos entre materiais e digitais, a pesquisa também possibilitou o desenvolvimento de um artigo do qual participei que foi enviado para o Sigradi. Primeiramente foi enviado um resumo que foi aprovado, nos dando a chance de desenvolver o artigo do qual a pesquisa desenvolvida foi de fundamental importância. O artigo aborda o processo de parametrização e fabricação digital de modo mais geral e utiliza o tipo de estrutura desenvolvida durante a pesquisa como exemplo de um método para a realização desse tipo de arquitetura.

## 5 – Discussão e Conclusões:

Os materiais e estruturas celulares foram desenvolvidas pela natureza por muitas razões, sendo uma delas a de conseguir maior resistência com menor densidade (SCHAEDLER, CARTER, 2016). Schaedler e Carter (2016), exemplificam essas relações com os ossos de pássaros, que consistem de uma casca resistente e um interior altamente poroso. O objetivo da pesquisa, desde o início, era fazer uso deste tipo de estrutura, estudar métodos de concepção e de fabricação delas bem como a sua viabilidade no meio arquitetônico.

As estruturas desenvolvidas durante a pesquisa tinham justamente esta intenção. Inclusive com as impressões em 3D realizadas foi possível verificar a relação entre a densidade e a resistência das estruturas, abordada por Schaedler e Carter, baseado na quantidade de células que eram inseridas num mesmo espaço. Disto conclui-se que, de fato, existe um grande potencial estrutural nos materiais celulares ainda pouco explorado dentro da arquitetura. Para que este cenário mude, ainda será necessário mais estudos, tanto no que diz respeito à concepção e desenvolvimento das estruturas, como no estudo mais aprofundado da estrutura e de como elas recebem e distribuem as cargas na sua extensão.

No início da pesquisa o objetivo era criar objetos que pudessem ser impressos e apresentassem a estética celular que o Voronoi proporcionava. Ao final dela estudamos a viabilidade dessas estruturas serem utilizadas como base para se desenvolverem projetos arquitetônicos, integrarem projetos como artificios de vedação e outros elementos arquitetônicos, bem como delas serem vistas, juntamente com o seu método de desenvolvimento, como uma nova forma de artistas digitais criarem.

A colega Sara Lauwers, que colaborou para o desenvolvimento desta pesquisa antes de mim, diz, ao final de seu relatório final que o que impedia que os para que o sólidos celulares gerados pelo uso do Voronoi em *Grasshopper*, ainda precisam ter sua representação melhorada para que pudessem ser impressos e testados. Sendo assim, este se tornou o primeiro objetivo desta pesquisa. Logo, com algumas alterações no código, foi possível a impressão dos sólidos. Como já dito, para que haja resultados mais consistentes, ainda será necessário testes para se estudar como que os sólidos recebem as cargas para que se possa ter maior segurança neles enquanto estrutura.

A pesquisa também nos permitiu concluir que os sólidos celulares são estruturas que possuem grande versatilidade. Não se encontrou nenhum maior impedimento para que as estruturas possam cumprir os papei que foram propostos e estudados para elas durante a pesquisa. Sendo assim, concluímos que estes sólidos celulares podem ser utilizados tanto na elaboração de equipamentos arquitetônicos, como vedações e cobogós, como no desenvolvimento de peças e obras de arte e, finalmente no processo de desenvolvimento de projetos de arquitetura,

Além dos sólidos celulares, também foram produtos da pesquisa os códigos. Veja bem, ambos os produtos, apesar de estarem diretamente ligados, possuem importâncias isoladas diferentes. E o código

que foi desenvolvido é importante para evidenciar a importância deste novo método de se fazer arquitetura. Não a partir de sólidos celulares exclusivamente, mas a arquitetura paramétrica em sim, o ato de se criar um conjunto de regras alimentadas com parâmetros e que, ajustando os parâmetros, altere-se o resultado. Criando uma arquitetura mais dinâmica, mais responsiva, mais tecnológica e mais eficiente.

Ao final da pesquisa, é possível afirmar que as metas foram totalmente alcançadas. Apesar da ocorrência da pandemia e, conseqüentemente, da quarentena, foram realizadas as impressões, o desenvolvimento do código não foi afetado, e as orientações prosseguiram online, principalmente para a execução do Workshop.

## 6 – Referências Bibliográficas:

NABONI, Roberto; KUNIC, Anja. **Design and Additive Manufacturing of Lattice-based Cellular Solids at Building Scale**. Em: SIGRADI, CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBERO-AMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 2017, Concepción, Chile. Conference paper. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/321234750>. Acesso em: 10 sep. 2018.

TRAMONTANO, Marcelo. **Quando pesquisa e ensino se conectam: design paramétrico, fabricação digital e projeto de arquitetura**, p. 544-550 . In: . São Paulo: Blucher, 2015. ISSN 2318-6968, ISBN: 978-85-8039-136-7 DOI 10.5151/despro-sigradi2015-100144

FLORIO, Wilson. **Modelagem Paramétrica, Criatividade e Projeto: Duas Experiências Com Estudantes de Arquitetura**. Gestão & Tecnologia de Projetos, v. 6, n. 2, p. 43-66, 4 fev. 2012.

GIBSON, Lorna J.; ASHBY, Michael F. **Cellular Solids: Structure and Properties**. 2o. ed. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 1999. 532 p. v. único. ISBN 978-0521499118.

SCHAEDLER, Tobias A.; CARTER, William B. **Architected Cellular Materials: Annual Review of Materials Research**, vol. 46, p.187-210, 21 abr. 2016 DOI 10.1146/annurev-matsci-070115-031624

CHIARELLA, M. **Superfícies paramétricas y arquitectura: Conceptos, ideación y desarrollo**. In: CONGRESO DA SOCIEDADE IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 8, SIGRADI 2004, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, Brasil: UNISINOS, 2004, p. 393-395.

HANNA, Sean.; TURNER, Alasdair. **Teaching parametric design in code and construction: Enseñando Diseño paramétrico en código y construcción**. In: CONGRESO DA SOCIEDADE IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 10, SIGRADI 2006, Santiago de Chile. Anais... Santiago de Chile, Chile, 2006, p. 158-161.

