

PROJETO E EXPERIMENTAÇÃO NO LABORATÓRIO CANTEIRO EXPERIMENTAL (EXLAB-MACK): PESQUISA E EXPERIMENTOS DE MODULAÇÃO NA ARQUITETURA

Carlos Eduardo Fernandes Filho (IC) e Guilherme Antônio Michelin (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

Nesta pesquisa é apresentado um estudo sobre módulos e peças modulares que possuem a propriedade de serem reproduzíveis em diversas escalas, de maneira ágil e fácil. Inicialmente é abordado acerca dos conceitos de tectônica e arquitetura paramétrica, tendo em vista suas aplicações no campo da construção. A seguir, é discutido sobre os usos e métodos destes conceitos na hora de projetar. É apresentado, como são realizados protótipos em larga escala utilizando as máquinas CNC e impressoras 3D, debatendo de que maneira esta prototipação interfere no processo de criação e elaboração do projeto. Estudos de casos que serviram de base para a criação das peças são apresentados, como por exemplo os Tsugi, conhecidos popularmente como encaixes japoneses. Nestes exemplos, são expostos os fatores que influenciaram a escolha dos mesmos, como materialidade, estruturação, funcionalidade e facilidade em ser reproduzido em larga escala de produção. Posteriormente, foi apresentado o desenvolvimento do estudo a partir de programas computacionais e paramétricos para projetar as peças propostas. Além disso, são explicitados os estudos realizados em workshops ministrados por especialistas na área. Em seguida, são apresentados os modelos de peças prototipadas durante o processo de pesquisa tanto em máquinas de corte CNC quanto em máquinas de impressão 3D, detalhando os fatores que afetaram as decisões projetuais da prototipagem. Por fim, o trabalho é concluído a partir da análise e conclusão realizada mediante a compreensão dos conceitos, estudos de caso e do ato projetual, elaborando uma abordagem capaz de integrar todos os assuntos discutidos ao longo da pesquisa.

Palavras-chave: Encaixe, Parametria, Prototipação

ABSTRACT

This report presents a research about modules and modular parts which have many different uses and can be managed easily and quickly. The first idea approached on this document is related to the tectonic and parametric architecture concepts and their applications on the building area. Then, it discuss about how the uses and methods concepts can help during a project. It will be also mentioned how CNC and 3D printer prototypes can be used in a large scale and what are the effects of it on a project elaboration steps. Background

researches will provide the origin and studies of those equipments, such as Tsugi (as known as japanese joints). Based on those examples, the factors responsible for the sample choice, like materiality, structuring, workability and facility will reveal how to make a large scale production of it. A study enhancement will also be presented based on programs computational and parametric in due to execute the portrayed parts. Besides that, specialized workshops researches will be explained. Next, the modular parts fabricated during the search process both in CNC cutting machine and 3D printer machines, detailing the factors that interfered on the prototyping decisions. Lastly, the work conclusion is based on the concepts comprehension, case studies and design act, building an approach capable of merge all topics discussed during the research.

Keywords: Joint, Parametric, Prototyping

1. INTRODUÇÃO

A evolução da sociedade tem apresentado uma busca e um uso da tecnologia como um instrumento potencializador de mudanças em âmbitos sociais e urbanos. Essa era da computação e tecnologia têm influenciado no processo de concepção de quase todas as áreas criativas e produtivas. O sucessivo desenvolvimento de softwares para a parametrização demonstra a importância, na arquitetura, como auxiliador do ato projetual, acarretando em mudanças tanto no âmbito de ensino como nas práticas projetuais (Mitchell & McCullough, 1995).

O uso dessas ferramentas propõe à integração do projeto e construção, necessitando de uma formação completa onde construtibilidade e tectônica são extremamente necessárias, ocasionado pela complexidade das formas, exigindo o uso de programas que comportem a modelagem, desenho e cálculos estruturais necessários, utilizando-se assim de programas baseados na NURBS – Non Uniform Rational B-Spline.

O projeto paramétrico automatiza o processo de prototipagem rápida pois ao se obter os desenhos em modelagem, o arquivo produz coordenadas diretamente destinadas à produção em fresas CNC ou impressoras 3D, sendo uma tradução do virtual para o real sem intervenção humana (OLIVEIRA; FABRÍCIO, 2009). Gorni (2007) define o termo como “um conjunto de tecnologias usadas para se fabricar objetos físicos diretamente a partir de fontes de dados gerados por sistemas de projeto auxiliado por computador”.

Deste modo, a pesquisa aborda os conceitos de tectônica e arquitetura paramétrica, visando identificar as suas aplicações na arquitetura, acoplado ao ato de projeto e prototipagem de módulos encaixáveis e reproduzíveis. Para a projeção buscou-se analisar e compilar estudos de caso.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O estudo sobre tectônica tem o intuito de abordar os conceitos e as aplicações desse termo na própria arquitetura ao longo dos anos. O significado do termo “tectônico” é equivocadamente entendido como um sinônimo para a palavra “construção” sendo que, etimologicamente, o termo deriva do grego “*Tekton*”, que significa carpinteiro ou construtor, desenvolvendo historicamente uma noção de construção de uma forma geral. O potencial poético da palavra é incorporado na arquitetura, não significando somente a manifestação física do componente estrutural, mas também a amplitude do conjunto em relação as demais partes do todo, sendo assim uma relação de interdependência mútua entre estrutura e construção, o que por final tem a capacidade de condicionar sua aparência (CECÍLIA, 2016).

Nos anos vinte, como abordado por Cecília (2016), os primeiros arquitetos modernos buscavam expressar plasticamente em suas obras, o paradigma universal da produção industrializada e em massa, sendo que o processo de industrialização se iniciou tardiamente em meados da década de trinta, e foi consolidado após a Segunda Guerra Mundial. Esses arquitetos evidenciaram uma contradição: edifícios construídos precariamente e de modo praticamente artesanal, mas com funções puristas, simulando assim uma tecnologia ainda não existente. Fundou-se assim um denominador comum entre alguns como a relação de construção e expressão plástica dos edifícios; a ênfase na expressão tectônica; a utilização da estrutura como elemento gerador do espaço arquitetônico e definidor da expressão plástica; e, por fim, a simplificação intencional dos procedimentos e detalhes construtivos.

A partir do potencial tectônico deste período alcançado através da interdependência mútua e harmônica entre estrutura, forma e construção, arquitetos brasileiros produziram obras de grande expressão tectônica, favorecidos pela disseminação e desenvolvimento da tecnologia do concreto armado, material plasticamente expressivo em sua forma original. Somado a isto, este material tem a capacidade de fundir elementos construtivos, como pilar, viga, laje e vedação. Mais do que a mera expressão plástica e artística, a tectônica moderna brasileira demonstra que a liberdade formal que caracteriza nossa arquitetura é indissociável dos conhecimentos que envolvem a construção (CECÍLIA, 2016).

Outro caráter dado a esse termo é o de “potencial de expressão construtiva”, popularizado por Kenneth Frampton, em seu livro “Studies in Tectonic Culture”, no qual considera também o termo como uma “poética da construção”, na qual a tectônica seria capaz de reunir os aspectos materiais da arquitetura aos aspectos culturais e estéticos da mesma (Amaral, 2009).

A partir do século 18, a técnica construtiva começou a ganhar autonomia em relação a arquitetura, estabelecendo uma nova compreensão física da construção, a partir do desenvolvimento de ciências de cálculo e a separação das profissões de arquitetos e engenheiros. Nessa nova sensibilidade estética, a ideia de solidez arquitetônica não estava mais ligada à forma geométrica, mas sim aos conhecimentos técnicos da construção.

O termo “tectônica” foi retomado na Alemanha no século 19, como uma forma de explicar a arquitetura em relação a sua construção. Karl Bötticher, arqueólogo alemão especializado em arquitetura publicou em 1844 o livro “*Die Tektonik der Hellenen*”, no qual propõe três noções para interpretar a arquitetura grega: *Werkform*, *Kunstform* e *Tektonik*. A primeira, *Werkform*, significaria “a forma operacional dos membros da arquitetura, ideal e econômica, mas sem expressão”; a segunda, *Kunstform*, “a forma artística dos membros da

arquitetura, o ornamento auto referencial ou analógico do sistema, a forma terminada” e por último, *Tektonik* faria a ligação entre as duas primeiras, significando a arquitetura na qual “as formas obedecem à estática e ao material, e são ao mesmo tempo uma demonstração do seu sistema”. No entanto, o livro de Bötticher limita-se à arquitetura grega, não possuindo a ambição de criar uma teoria geral sobre a arquitetura.

O termo “tectônico” continuou a ser utilizado pelos arquitetos do século 20, mas de maneira menos presente e, aparentemente, em contraste com a tradição do século anterior, tal como o termo apareceu no livro *Construtivismo*, obra manifesto escrita por Alexei Gan, um dos principais artistas integrantes do famoso movimento russo que deu nome ao livro. Gan desenvolve uma teoria da arte e uma redefinição da arquitetura baseada em três disciplinas: *tektonika*, *faktura* e *konstruktsiia*. Segundo o autor, a noção de *tektonika* deveria ser interpretada no âmbito da reorganização proposta pelo grupo construtivista, na qual cada ação deveria ser informada por uma reestruturação violenta das camadas inferiores. O autor não se referia à materialidade da arquitetura e não levava em conta o sentido que o termo tomou no contexto alemão, seja por uma possível recusa em reaproveitar as contribuições alemãs, seja por uma recusa política. De todo modo, o sentido dado por Gan ao termo tectônico não parece ter tido grande repercussão devido, possivelmente, às traduções do livro, que até hoje não incluem o texto na íntegra (Amaral, 2009).

A tectônica aparece como crítica da arquitetura do fim do período modernista, e vem constituir um dos principais temas do debate contemporâneo, ao lado da semiótica, da fenomenologia, do desconstrutivismo e do regionalismo crítico. Um debate proposto por Peter Collins, cria a noção de que tectônica é uma nova disciplina, podendo ser considerada uma ciência, para ser ensinada nas escolas de arquitetura. Para o autor, a tectônica denota uma relação inseparável entre a expressão artística e a lógica construtiva e deveria ser recolocada no centro do debate arquitetônico.

Outro autor da época que aborda esse tema é Edward Sekler, cujo texto participa de um debate sobre estrutura nas artes e arquitetura. O termo para ele significa “uma expressão das relações entre forma e força estática da construção”.

Estrutura como conceito mais geral e mais abstrato designa um sistema ou um princípio da prescrição com o objetivo de dominar as forças que agem no edifício, como o esqueleto, os arcos, a abóbada, etc. Construção designa em contrapartida a realização efetiva através de diversos materiais e métodos de montagem. (Sekler, 1965).

Portanto, o termo "tectônico" permanece na arquitetura ao longo da história, contendo diversos significados com o passar do tempo, em diversos cenários. A partir desses conceitos, como o de construção (estrutural), forma, materiais e disciplina de ensino, é possível compreender a existência de uma relação entre "tectônica" e o estudo de parametria e da modelagem paramétrica, no ponto em que o uso de computadores e softwares estão revolucionando o modo de pensar, ensinar e projetar arquitetura.

O uso de novas ferramentas como *scriptings*, algoritmos e programas paramétricos marcam uma mudança na prática da arquitetura e no método de ensino (MITCHELL; McCULLOUGH, 1995). Com o advento de máquinas com capacidade de controlar números e equações, o projeto de geometrias mais complexas passou a receber auxílio.

O poder dos computadores está na sua capacidade de calcular rapidamente complexas fórmulas matemáticas. No âmbito do projeto de edifícios, isso tem permitido viabilizar geometrias complexas, introduzindo a possibilidade de criar e manipular toda uma nova família de formas e superfícies curvas. Novas ferramentas computacionais em ambientes paramétricos permitem programar as dependências entre componentes, por meio do uso de variáveis, chamadas parâmetros. (FLORIO, 2009, p. 572)

Pode-se chamar arquitetura paramétrica aquela que usa a parametrização como base técnica para gerar formas digitalmente (Kolarevic, 2000). Michael Meredith define em seu livro "From Control to Design: Parametric/ Algorithmic Architecture" que:

Parametrização é o termo da Matemática que designa a descrição de elementos cuja variação de valor modifica a solução de um problema sem lhe modificar a natureza. A concepção paramétrica é o processo iterativo baseado nas relações consistentes entre objetos e não em quantidades métricas fixas, permitindo que as mudanças em um único elemento sejam propagadas por todo o sistema.

(MEREDITH, 2008).

Apesar do design paramétrico e a prototipagem rápida trazerem vantagens para a arquitetura, como diminuição do tempo de trabalho e a possibilidade de variações em um mesmo projeto, agilizando a visualização dessas, o seu uso no ato projetual e na própria construção é muito recente e limitado, ao se comparar com áreas como engenharia aeronáutica, mecânica e medicina (OLIVEIRA; FABRÍCIO, 2009). Os modelos paramétricos, para os arquitetos Lee & Beurecueil, permitem que o arquiteto explore múltiplas alternativas

já que os programas são interativos, possibilitando a obtenção de diferentes soluções e auxiliando a tomada de decisões mais concretas. Ou seja, há exploração de novas geometrias sem a necessidade de criar modelos para cada cenário.

O modelo paramétrico automatiza o processo de tradução do virtual para o real, por conta da fabricação digital de prototipagem rápida, no qual o arquivo consegue ser produzido diretamente em fresas CNC ou em impressoras 3D, tendo apenas que transformar o arquivo em formato STL (Standard Template Library) (OLIVEIRA; FABRÍCIO, 2009). Portanto, a utilização da parametrização dá maior autonomia ao arquiteto, para pesquisa e desenvolvimento de novas soluções e ainda, com o auxílio de programas de análise, possibilita rapidamente alterações de soluções projetuais com melhor desempenho, acelerando o processo de concepção de projeto e produção de modelos (HORTA, 2009).

Além disso, os projetos paramétricos e de modelagem generativa, na maioria dos casos, tem um alto nível de complexidade, sendo assim, difíceis ou quase impossíveis, de serem modelados em maquetes tradicionais ou realizados por meio de desenhos e cálculos feitos de formas manuais (OLIVEIRA; FABRÍCIO, 2009). Por conta disso, o uso das impressoras 3D e corte a laser, são indispensáveis para o ato projetual paramétrico. Sendo assim, os softwares afetam diretamente a produção arquitetônica, como cita William Mitchell, “os arquitetos desenham aquilo que conseguem construir, e constroem aquilo que conseguem desenhar”, definindo o background teórico sobre a aplicação dessas novas tecnologias na arquitetura.

O desenvolvimento desse tipo de geometria está ligado aos avanços da computação, da matemática e dos programas CAD (*Computer-Aided Design*). Nos programas CAD de primeira geração, os objetos são definidos pelas suas propriedades como entidades independentes. Com a introdução das curvas NURBS (*Non Uniform Rational BSplines*), possibilitou-se a manipulação de determinados pontos das mesmas. Como as curvas NURBS são definidas através de fórmulas matemáticas, identifica-se o uso de cálculos para a definição de uma forma mais complexa do que se era realizado até então (HENRIQUES; BUENO, 2016). Interfaces de *scripts* também foram desenvolvidas devido a necessidade de criar tais programas para evitar que as funcionalidades tivessem de ser adicionadas aos programas principais. Foram exigidas cada vez mais funções específicas para poder atender aos diversos projetos existentes por isso, esses programas de script começaram a ser criados, como o Processing, voltado para a área visual, o Generative Components e o Grasshopper, lançados em 2001, 2003 e 2007, respectivamente.

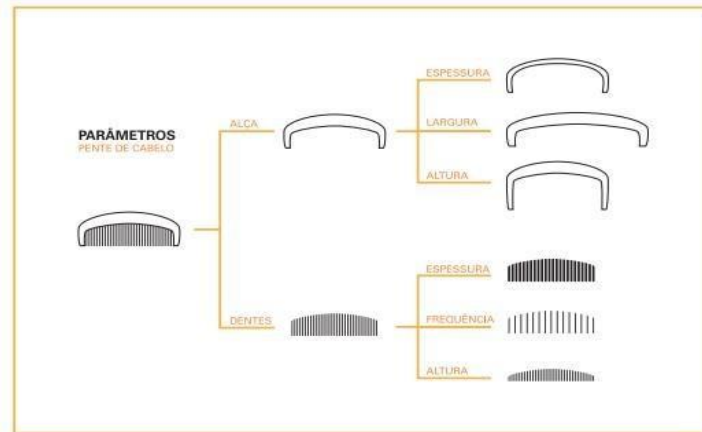
O crescimento sucessivo destes softwares demonstra que o desenho paramétrico como ferramenta de projeto vem sendo utilizado cada vez mais ao longo dos anos, mas para ser aplicado de maneira correta, é necessário possuir o conhecimento básico em matemática e programação (estrutura e linguagem do computador, baseada em algoritmos), pois os softwares que exercem esse tipo de função, apesar da diferença entre eles, são editores de gráficos de algoritmos e de equações matemática, em relação aos parâmetros.

Wilson Florio em seu artigo “Modelagem Paramétrica no Processo de Projeto em Arquitetura” (2009) cita que “O uso de parâmetros para definir a geometria de elementos construtivos, no âmbito da construção civil, tem provado ser cada vez mais eficaz no processo de projeto”. O parâmetro é definido como:

Um valor que tem efeito sobre o resultado de um processo. Ele pode ser direto como a quantidade de açúcar em uma receita, ou complexo como o limiar de ativação de um neurônio no cérebro. No contexto da arquitetura e do design, parâmetros descrevem, codificam e quantificam as opções e restrições existentes dentro de um sistema. Uma restrição comum é o orçamento disponível para um projeto, enquanto uma opção de configuração é o controle de cor, tamanho, densidade ou material. (REAS; MCWILLIAMS; LUST, 2010).

Estes permitem construir regras, traçar relações entre os pontos de uma curva ou de uma superfície e definir o relacionamento entre pontos. Portanto, as formas derivadas delas capacitam a criação de superfícies curvas controladas (FLORIO, 2009). Este tipo de modelagem permite alterações rápidas dos parâmetros, obtendo diferentes resultados, podendo assim testar diversas geometrias, sem a necessidade de recomeçar todo o projeto, por conta das relações e hierarquizações que o arquiteto constrói, como demonstrado na imagem 1.

Imagem 1: Esquemática do conceito de parâmetro.



Fonte: KOYAMA, Anderson. Design Generativo - Estudo exploratório sobre o uso de programação no design. Disponível em: <
http://www.fau.usp.br/fauforma/2015/assets/anderson_vieira.pdf>. Acessado em: 21 jun. 2016

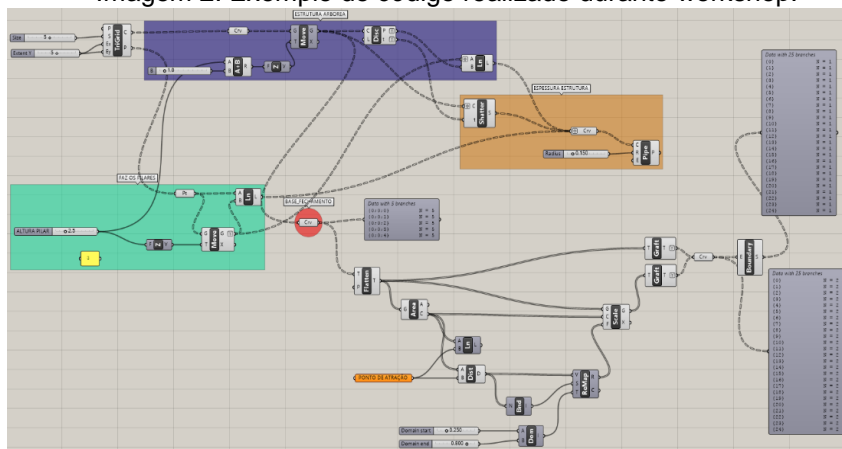
Apesar de trazer diversos benefícios para a arquitetura, o arquiteto precisa reinventar-se e estar atualizado em relação às novas tecnologias, além da necessidade de criar uma nova forma de pensar a arquitetura, por conta da possibilidade de modelar no computador e paralelamente pensar em sua forma, imprimindo e testando em 3D, o que antes se fazia em maquetes físicas manuais. Atualmente, os programas de computadores possuem propriedades nas quais, ao se desenhar uma planta, o próprio programa já desenvolve as elevações e os cortes, agilizando assim o entendimento do arquiteto sobre o próprio projeto. Além disso, para o ensino dessas técnicas, os professores precisam reinventar-se, pois os programas não se restringem apenas à representação gráfica, necessitando a inclusão de novas técnicas de modelagem, além de envolver outros tipos de conhecimentos, como o de programação computacional, a o estudo da geometria para a obtenção de superfícies regradas e o de sistemas construtivos. Sem esses elementos, torna-se complicada a plena compreensão da relação espacial e de outros elementos da construção, como da própria técnica construtiva. Com isso a parametria está conectada diretamente com a tectônica arquitetônica.

A construção paramétrica não está ligada apenas à forma do projeto, mas sim a forma em relação com a função e a estrutura. Isso demonstra como, apesar de uma tecnologia considerada recente, o foco e objetivos permanecem os mesmos das construções e projetos tradicionais que se voltavam seu foco à função, por exemplo.

As peças foram idealizadas e desenhadas no *Rhinoceros*, programa de modelagem em 3D com o sistema operacional denominado NURBS, modelo matemático usado regularmente em programas gráficos para gerar e representar curvas e superfícies a partir de cálculos, gerando formas mais orgânicas e precisas.

O *Grasshopper* é uma ferramenta de edição de algoritmos gráficos, desenvolvida por David Rutten em Robert Mcneel & Associates. Desenvolvido como plug-in, funciona de forma integrada ao *Rhinceros* e é utilizado, principalmente, para a criação de algoritmos generativos que resultam em códigos para a obtenção, em sua maioria, de geometrias em três dimensões a partir de programação e scripts. Há a outras formas de algoritmos, incluindo a extração de dados de redes sociais como o Twitter, inserções de textos e números e combinação de dados geográficos urbanísticos. A geração desses códigos é realizada a partir de componentes, conectando a saída destes com às entradas dos subsequentes, representado na imagem 2.

Imagem 2: Exemplo de código realizado durante workshop.



Fonte: Autoria própria

Por conta disso, a alteração do projeto ocorre de maneira muito mais ágil e prática pois, as características mudadas, alteram os atributos dos componentes escolhidos, ajustando o desenho parametrizado automaticamente quando se modifica um elemento com um novo valor. O Grasshopper oferece novas formas de pensar, projetar e controlar os processos de projeto e modelagem 3D, incluindo a automatização de processos repetitivos, a utilização de funções matemáticas para controlar ou gerar geometrias, a acelerada modificação de atributos em modelos complexos e a capacidade de criar formas complexas através de repetições de geometria simples. Portanto, o Grasshopper combina a abordagem gráfica do Rhinceros com as técnicas algorítmicas encontradas em scripting, formando geometrias de maneira paramétrica, ou seja, consegue-se ajustar todos os aspectos da forma de maneira ágil.

3. METODOLOGIA

A primeira etapa, constitui-se na compilação de estudos de casos e o estudo dos conceitos já citados para iniciar o projeto dos módulos. Foi elaborado um estudo de caso sobre projetos que continham elementos modulares ou que se utilizam os modos de prototipagem rápida. Um dos exemplos é o WikiHouse, um projeto *open source* de uma estrutura feita em

madeira compensada, cortadas em máquinas CNC, possuindo o intuito de reinventar a maneira projetar e construir casas. O objetivo é que as pessoas façam o download e imprimam as suas casas e componentes que podem ser montados com o mínimo de habilidade formal ou treinamento. Este projeto é uma alternativa inovadora de habitação de baixo custo que pode ser adaptada e implementada no mundo inteiro.

O projeto está sendo desenvolvido por profissionais da área como arquitetos, designers, engenheiros, fabricantes e construtores, colaborando para desenvolver as melhores, mais simples, mais sustentáveis tecnologias de construção de alto desempenho e que qualquer pessoa possa usar e melhorar sua condição.

Por ser um programa colaborativo seu crescimento, depende do acréscimo realizado pelos usuários e a partir de desenhos e informações fornecidas pelos mesmo, o que geraria um banco de dados auxiliar ao processo. Parvin diz que o programa “ainda utilizará pequenos detalhes: como funcionam os materiais em diferentes umidades, que tipo de eletricidade será usada, até mesmo as leis de zoneamento da região”.

A WikiHouse Foundation é uma fundação sem fins lucrativos de tecnologia aberta, com sede no Reino Unido, com o intuito de permitir que empresas, organizações e governos trabalhem juntos para desenvolver novas tecnologias abertas, padrões e infraestrutura comuns para habitação e desenvolvimento sustentável. A fundação tem a missão de “colocar as soluções de design para a construção de baixo custo, baixa energia, casas de alto desempenho nas mãos de todos os cidadãos e empresas da Terra” (PARVIN, 2013) além de se utilizar da digitalização para facilitar o entendimento de projetos, investimentos, fabricação e montagem, buscando criar uma nova indústria de habitação formada por comunidades.

Além disso, as tecnologias desenvolvidas pela WikiHouse são realizadas por uma comunidade aberta de profissionais ao redor do mundo, sendo que, assim como os projetos são open source, tendo acesso para todos, qualquer pessoa pode participar, seja melhorando, disseminando, adaptando as tecnologias existentes ou desenvolvendo novas tecnologias com base nos princípios de design da fundação.

Outro estudo foi realizado a partir do ArboSkin Pavilion, que é um pavilhão curvo localizado em Stuttgart, na Alemanha foi produzido a partir do uso de módulos de bioplástico, sendo 90% de material renovável. Esse material é feito a partir de biomassas, que oferecem alternativas para o plástico derivado dos combustíveis fósseis. A intenção dos alunos e professores da Stuttgart University's ITKE (Institute of Building Structures and Structural

Design) foi criar uma forma que demonstrasse as propriedades estruturais do bioplástico para o uso na construção. O instituto tem anos e experiência na produção de construções com geometrias complexas baseadas em programas computacionais.

O material conhecido como “Arboblend”, foi produzido pela empresa alemã Tecnar a partir de diferentes polímeros e fibras naturais para reforçar estruturalmente. Os módulos piramidais são feitos a partir do bioplástico colocado em formas para deixar os módulos leves e sem excesso de material. A forma final é formada por uma pele de curvas em diferentes sentidos unindo os módulos piramidais por meios de módulos de apoio e suporte entre as arestas dos módulos. Uma máquina CNC foi utilizada para elaborar as diferentes aberturas nos módulos, criando uma fachada livre e interativa. O material recortado nesse processo é recolhido e volta para a origem do produto, podendo ser reutilizado com facilidade. O material possui alta durabilidade e segurança em relação ao fogo, utilizando o mínimo de componentes derivados de combustíveis fósseis.

Em conjunto com esses estudos de caso, realizou-se uma pesquisa sobre encaixes em madeira pois, antes da invenção de elementos para fixação, a técnica japonesa de encaixe de madeira estava sendo realizada por artesãos japoneses para unir peças para a obtenção de móveis e estruturas para construção. Essa técnica não necessita do uso de pregos, parafusos ou cola, precisando apenas de encaixes realizados com perfeição em suas medidas e cortes. O encaixe realizado corretamente pode substituir um conector metálico em questão de resistência. Com o advento da tecnologia, estes foram sendo aprimorados e feitos de forma mais rápida e precisas. Há a existência de diferentes encaixes para determinadas finalidades, não perdendo a resistência física do material ao desmontar e remonta-los, facilitando assim o transporte e o manuseio. Apesar da dificuldade de obtenção de informações desta técnica, pois as guildas familiares de carpintaria resguardavam-nas para si mesmas, aos poucos foi sendo disseminada para o público. A partir desse conhecimento, o professor Jochen Gros e o designer Friedrich Sulzer lideraram uma pesquisa realizada no C.Lab da Escola de Design Offenbach, na Alemanha, no qual desenvolveram 50 diferentes técnicas destes encaixes em madeira que eram passíveis de serem fabricados digitalmente através de ferramentas como CNC e cortadoras a laser.

Sempre que nos deparamos com eles, somos tomados por admiração: admiração pelas habilidades do artesão, como criador, mas também admiração pelo equilíbrio entre função e beleza, que transforma o mobiliário ou templo em uma obra de arte. Com o Surgimento da industrialização, os encaixes tradicionais de marcenaria foram cada vez mais esquecidos. A produção deve ser, acima de tudo, eficiente, portanto, não há mais lugar para

as juntas tradicionais de marcenaria. Ou será que há? Ao passo que máquinas controladas por computador se aproximam cada vez mais das marcenarias, o modo como as peças são unidas em uma construção devem ser reconsiderados. (GROS, [ca.] 2015)

Atualmente, os complexos cortes necessários para criar estas articulações são muito caros para justificar seu uso na arquitetura comum e corriqueira. Mas com o aumento das tecnologias de fabricação CNC e a impressão em 3D, pode tornar um modo de construção viável. Além disso, o desenvolvimento dessas tecnologias desencadeia em uma revolução das técnicas de encaixe, que antigamente eram realizadas pelos artesões e carpinteiros japoneses será substituído pela produção maquinaria.

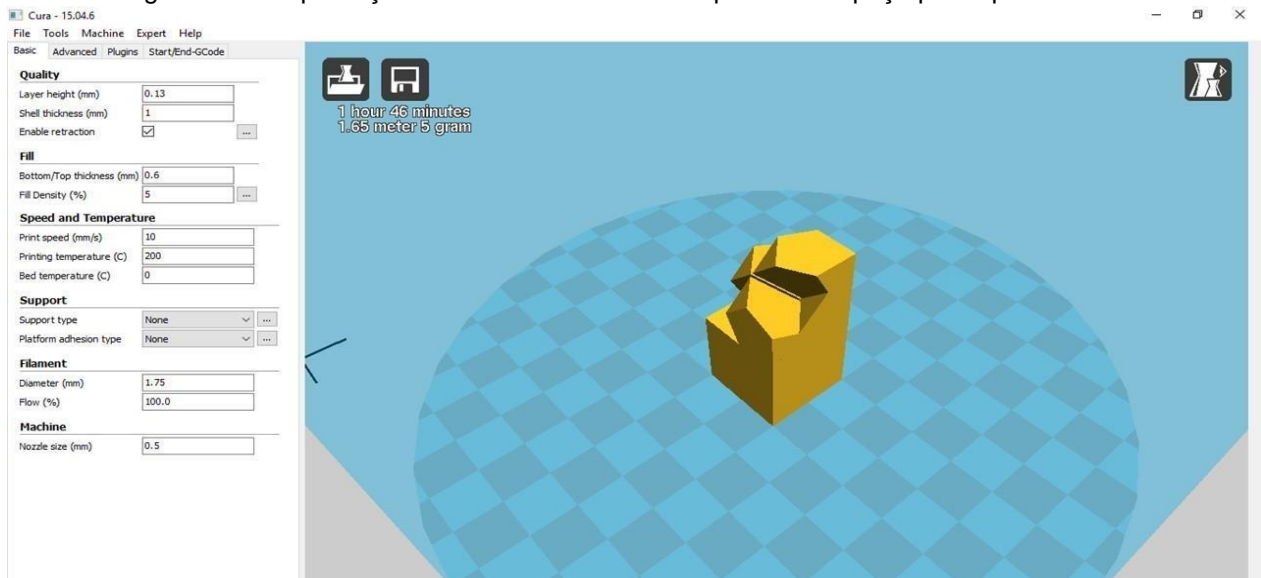
Para poder fabricar as peças nas máquinas CNC e 3D, é necessário entender seu funcionamento, podendo assim dinamizar a produção. Um processo possível, explicado por Canciglieri Junior, Selhorst Junior e Sant'anna (2017), é o Rapid Product Development (RPD) que envolve a manufatura e a evolução de protótipos rápidos. A partir do seu avanço, novas pesquisas trouxeram ao mercado equipamentos CNC com custos mais atraente do que aqueles nos tradicionais centros de usinagem, sendo uma alternativa a prototipação rápida tradicional, fazendo assim surgir o conceito de SRP (Subtrative Rapid Prototyping). Neste processo, a fabricação é iniciada a partir de um bloco de material, desgastando-o até obter o objeto desejado. Os equipamentos são pequenos, com perfil de desktops, podendo ser ligados em redes domésticas de energia elétrica. Essas máquinas possuem facilidade de operação e geralmente contam com software CAM integrado e otimizado para o processo de prototipagem, proporcionando a designers e engenheiros a possibilidade de criação de protótipos rápidos de excelente precisão e acabamento superficial. O acabamento superficial e o tempo de execução dos protótipos também sofrem influência direta do tipo de material, das ferramentas de usinagem e dos controles via software das atividades do equipamento antes da construção do objeto (CANCIGLIERI JUNIOR; SELHORST JUNIOR; SANT'ANNA, 2017).

CNC é uma sigla de "Controle Numérico Computadorizado", do inglês "Computer Numeric Control". Este sistema de fabricação controla as máquinas através de instruções descritas em códigos específicos pertencentes à linguagem de programação de controle numérico. Dentre estes códigos, existem denominações para cada instrução específica que a máquina irá realizar, por exemplo, o G-Code ou código G. Apesar de ser o nome generalizado para os códigos programados para as máquinas CNC, é especificamente o código que dita

os movimentos para a realização do projeto. Os códigos M e T são os que geram as funções e as ferramentas de perfuração, respectivamente. Os códigos X, Y e Z são responsáveis por determinar a posição absoluta da fresadora.

Para o uso da impressora 3D, é necessário o desenvolvimento de um modelo em programas 3D para poder ser enviado ao software da impressora. Este divide o modelo em inúmeras camadas, sendo realizado nas duas dimensões, além de definir as principais características da impressão, como velocidade, escala, espessura das camadas e o quanto de matéria prima ele consumirá para cada camada, resultando num período de tempo estipulado pelo software (Imagem 3).

Imagem 3: Exemplificação das características de impressão da peça prototipada no software.



Fonte: Autoria própria.

Existem 3 modos de impressão 3D, utilizando diferentes matérias primas. O mais comum é o Modelagem por Fusão e Depósito (FDM – Fused Deposition Modeling), que utiliza um filamento plástico para a realização dos objetos. Conforme há o derretimento do material, ocorre a injeção deste em uma base, com a extrusora movimentando-se nos eixos X e Y. Após a camada estar totalmente pronta, a base fixa no eixo Z desce alguns milímetros para a realização da nova camada, ocorrendo este processo até o fim do objeto. Existem impressoras que ao invés de a extrusora movimentas nos eixos X e Y, se movimenta no eixo Z, fazendo com que a base se movimente nos eixos X e Y, tendo o restante do processo de impressão semelhante ao anterior. Outro método de impressão é a Sinterização Seletiva a Laser (SLS - Selective Laser Sintering) que se utiliza de laser para esculpir os objetos em uma espécie de pó extremamente fino, podendo trabalhar com uma grande variedade de materiais como metal, plástico, polímeros e entre outros. Para iniciar o processo, é necessário o

preenchimento da câmara de impressão com o pó, em seguida, o laser de altíssima potência, é projetado no pó, fazendo com que o material entre em fusão, criando assim uma camada mais rígida. Após a finalização da camada, a plataforma central desce e cobre-se novamente toda a superfície de impressão com o material, cobrindo a camada criada com o pó e gerando novamente uma superfície uniforme. Este processo é repetido até que todas as camadas estejam finalizadas e o objeto pronto. Ao final, remove-se o excesso de pó, que pode ser reutilizado, diminuindo o desperdício. A versatilidade deste equipamento permite a criação de objetos mais complexos, podendo criar, inclusive, partes móveis. O último método é a Estereolitografia (SLA - Stereolithography) que, como a anterior, é preenchido um recipiente com material líquido específico para a impressão, uma espécie de resina plástica, não mais o pó. O laser é projetado na superfície do líquido, fazendo com que ele solidifique nos locais aonde há o contato com o laser. Depois da impressão da camada, a plataforma desce para que possa ser criada uma nova camada e o líquido novamente cobre a superfície inteira. Assim como nas outras impressões, o processo é repetido até a finalização do objeto que em seguida deve ser colocado em um recipiente com luz ultravioleta, para concluir o processo de cura dos plásticos (CANCIGLIERI JUNIOR; SELHORST JUNIOR; SANT'ANNA, 2017).

Tabela 1. Características da prototipagem rápida no Brasil

Fatores Determinantes	Processos		
	FDM	SLA	SLS
Variedade de Materiais	Média	Pequena	Grande
Translucidez	Sim	Sim	Não
Qualidade Superficial	Regular	Regular	Boa
Pós-Acabamento Superficial	Regular	Regular	Boa
Precisão	Regular	Excelente	Boa
Resistência ao Impacto	Boa	Regular	Boa
Resistência à Flexão	Excelente	Baixa	Excelente
Custo do Protótipo no Brasil	Médio	Alto	Médio
Pós-Processo	Sim	Sim	Sim
Pós-Cura	Não	Sim	Não

Fonte: CANCIGLIERI JUNIOR, Osiris; SELHORST JUNIOR, Aguilar; SANT'ANNA, Ângelo Márcio Oliveira.

Os encaixes têm a finalidade de serem montados facilmente pelos usuários que os utilizarão, tanto para móveis como para construções em maiores escalas. A partir deste pensamento, optou-se em reproduzir peças para análise em relação ao número de encaixes possibilitados, prototipados em impressora 3D e máquina CNC. Foram reproduzidos encaixes como o mortise e o tenon, que são os mais antigos e mais comuns conhecidos pela humanidade e o *Kawai Tsugite*, que foi inventado por um professor japonês da Universidade

de Tóquio, funcionando como uma articulação de madeira de três vias. O primeiro encaixe, apesar de ser o mais disseminado, delimita o projeto por conta de possuírem apenas uma forma de encaixe. O segundo, apesar da complexidade, gera três possibilidades de formas a partir do mesmo encaixe, ampliando assim as possibilidades de projeto.

Além desta reprodução, a partir das análises, foram projetadas peças no Rhinoceros 3D, que tinham como base os estudos já realizados, diversificando os encaixes e as escalas de prototipagem, com o viés de possibilitar o maior número de encaixes possíveis para cada situação, visando ser o mais intuitivo possível para que o usuário saiba utiliza-la sem treinamento prévio. A área de corte de máquinas CNC e a área de impressão de impressoras 3D, serviram como determinantes para gerar o desenho geométrico e o tamanho das peças pois, o espaço delimita a área de atuação. Além disso, o desenho foi adequado ao processo de prototipagem, diminuindo o tempo de fabricação e as áreas de sobra do material que seriam inutilizados após o corte das peças. Portanto, todo o processo de ato projetual dos encaixes foram determinados para a prototipação rápida.

Em relação aos materiais escolhidos para a realização das peças modulares, para a prototipagem rápida e teste do funcionamento dos encaixes, utilizou-se isopor de 5cm de espessura, pois é um material leve, barato e é facilmente cortado na máquina CNC. Para a impressão 3D, existem 2 tipos de matéria prima, o PLA e o ABS. O primeiro é um termoplástico biodegradável bastante rígido e resistente, sendo mais rígido que o ABS, apesar de ser menos resistente à impactos, pelo fato de ser difícil de deformar ou flexionar, possui baixa resistência ao atrito e temperaturas elevadas. Sua alta fluidez de extrusão e baixa contração produz peças mais detalhadas, com melhor acabamento da superfície e com maior precisão. É indicado para produção de protótipos que não sejam submetidos às condições de esforços mecânicos, atritos ou altas temperaturas, e que estejam sujeitas à esforços mecânicos ou que necessitem de flexibilidade do material. O material é biodegradável derivado de fontes renováveis, como amido de milho, cana e raízes de mandioca, tendo o seu tempo de degradação muito abaixo comparado aos outros plásticos, com densidade de 1,24 g/cm³ e temperatura de transição vítrea de 60° (SANTOS; COELHO; ASSAD FILHO, 2016).

Já o ABS é um termoplástico derivado do petróleo, com bastante disseminação na indústria, em especial automotiva. O material é bastante rígido, possui resistência à altas temperaturas, à atrito, a esforços mecânicos e é ótimo para resistência a impactos por conta da sua leve flexibilidade, permitindo uma pequena deformação e flexão. Apesar de produzir peças fortes, o nível de precisão e de detalhamento é menor comparado ao PLA, contrapondo ao seu alto nível de acabamento de superfície. É indicado para protótipos funcionais, peças resistentes, que necessitam de encaixes em sua montagem, ou que necessitem de

flexibilidade (SOTO, 2016) e possui densidade de 1,03 g/cm³ e temperatura de transição vítrea de 105°.

No caso da madeira, o material possui algumas propriedades características como o baixo peso, o baixo consumo energético, é excelente isolante térmico e acústico, material de fonte renovável e sustentável e apresenta alta resistência em relação a sua baixa massa específica capaz de suportar sobrecargas em curta duração sem efeitos para a estrutura e apresenta resistência mecânica tanto a esforços de tração como a compressão. Além de resistência a tração na flexão e tem resistência a choques e cargas dinâmicas absorvendo impactos que dificilmente seriam absorvidos com outros materiais, tornando um material viável para a construção dos módulos.

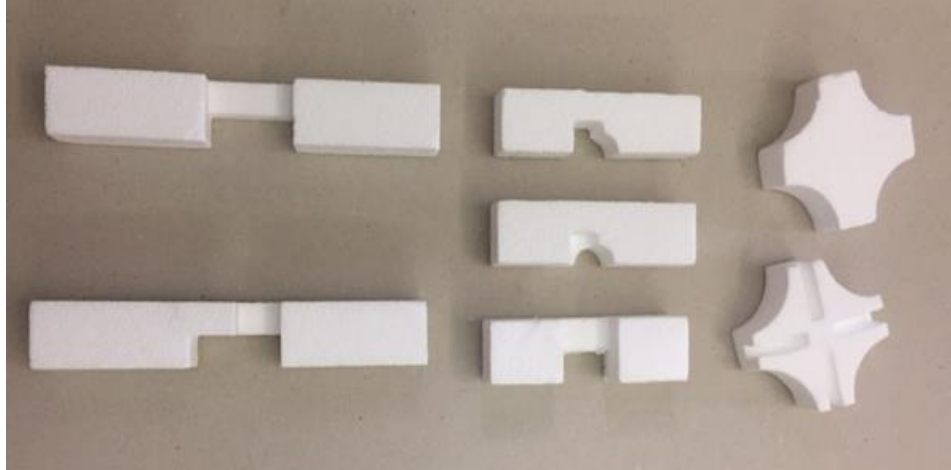
Após o estudo teórico de Tectônica e Arquitetura Paramétrica e dois workshops ministrados pelo LAS, Lab for Architectural Singularity, o que foi aprendido nesse período serviu de apoio para aplicação na prática desses conceitos, pois este escritório é focado neste ramo arquitetônico. O primeiro workshop, denominado de Grasshopper Day, ocorreu em parceria com a Universidade Presbiteriana Mackenzie, possuindo uma abordagem de introdução ao Rhinoceros e ao Grasshopper. Neste, foram abordadas as possibilidades que o software possui e como realizar um código, a partir de componentes, para geração de formas paramétricas. O segundo workshop, ocorreu no IAB SP, Instituto de Arquitetos do Brasil, e foi denominado “Emergent Virtual Spaces: Minhocão”, este teve como foco a exploração da realidade virtual como uma representação e abordagem crítica da arquitetura, transmitindo sensações a partir da visualização através dos óculos de realidade virtual. Entre os temas abordados estavam presentes as técnicas paramétricas de modelagem e diretrizes de design acoplados a realidade virtual.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Para a experimentação das peças modulares, houve uma análise para a escolha de peças a serem reproduzidas e modeladas em softwares 3D, entre os escolhidos estão os encaixes *Isuka Tsugi*, *Kakushi Mechiire*, disponíveis no livro “*Wood Joints in Classical Japanese Architecture*”, *Sampo Gumi Shikuchi*, e *Kawai Tsugite*. Após a escolha, foi realizado um estudo das mesmas para entender o funcionamento de cada encaixe e buscar levantar as medidas para modelar corretamente. Posteriormente, optou-se pela prototipação de peças que possibilitam maiores possibilidades de projetos e usos na arquitetura e construção, focando a atividade nos dois últimos, mostrados nas imagens 4 e 5. Além dessas reproduções, foram modeladas peças seguindo o mesmo princípio da carpintaria japonesa e que

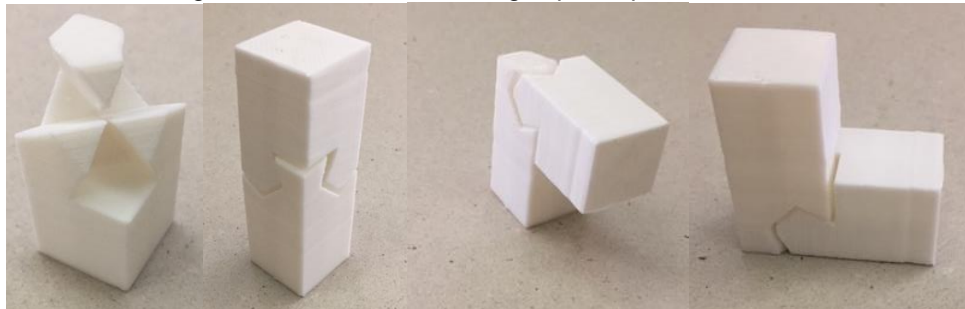
resultassem em diferentes encaixes, para que pudessem ser testados protótipos em diferentes posições e formas, buscando produtos leves e resistentes, capazes de suportar ripas de 30 centímetros de espessura.

Imagem 4: Encaixe Sampo Gumi Shikuchi prototipado em duas escalas em isopor a partir do corte em CNC.



Fonte: Autoria própria.

Imagem 5: Encaixe Kawai Tsugite prototipado em 3D.



Fonte: Autoria própria.

Todos os encaixes modelados no programa Rhinoceros 3D passaram pelo mesmo processo de conversão do arquivo em STL após a modelagem, extensão que é utilizada no programa da fresadora CNC. Após esta etapa, o processo de fabricação das peças pôde ser iniciado, com o auxílio das máquinas disponibilizadas pelo laboratório da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Presbiteriana Mackenzie e pelo Fab Lab Livre SP da Galeria Olido, laboratório objetivado na criação e inovação, acessível a todos para desenvolvimentos de projetos. As máquinas utilizadas foram a Roland modelo MDX-40 e CNC GForte (R) da Gois Robótica, respectivamente nos laboratórios citados.

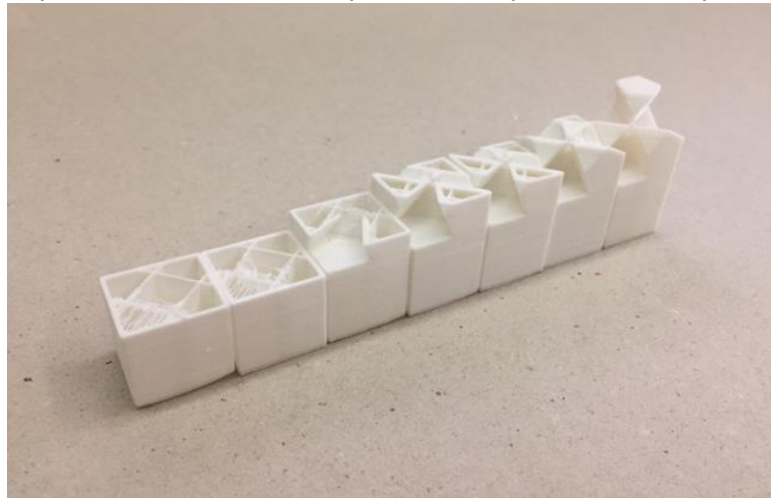
As duas trabalham com o método de Prototipagem Rápida por Subtração (SRP). A máquina utilizada na Universidade Presbiteriana Mackenzie possibilitou apenas do uso de corte em três eixos, X, Y e Z. Já no Fab Lab, apesar de haver a possibilidade do uso do quarto eixo por ser um laboratório aberto, utilizam-se apenas de códigos G *open source* portanto, a

utilização do código para o quarto eixo ainda não foi disponibilizado para uso nesses laboratórios.

Após a análise das peças, notou-se a inviabilidade de prototipação de dois dos modelos de peças escolhidas devido à ausência do quarto eixo, uma vez que contam com mais de uma face com recortes ou por trabalharem com cilindros, sendo inviável à obtenção precisa destas. Por conta disso, essas peças foram prototipadas em impressora 3D, a partir do uso de filamento PLA, anteriormente explicado. Para que isso fosse possível, o arquivo da modelagem em programas 3D, foi convertido para .OBJ para ser utilizado no programa da máquina propriamente dita.

O processo de modelagem, remodelagem e prototipagem foi constante, uma vez que ao longo do processo, alguns modelos de estudo foram elaborados de maneira equivocada e impressões que resultaram em protótipos não finalizados por conta do descolamento do material da superfície de impressão, representado na imagem 6.

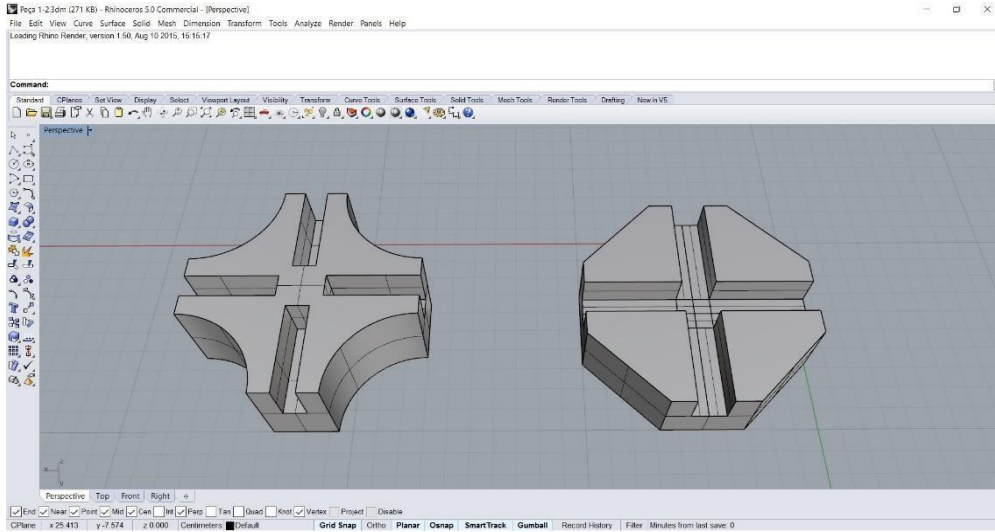
Imagem 6: Impressões realizadas na impressora 3D que falharam no processo de fabricação.



Fonte: Autoria própria.

Com intuito de agilizar o processo de fabricação e economizar material, os protótipos foram remodelados pois, a fabricação de partes arredondadas e curvas atrasa a finalização das mesmas uma vez que, a execução da peça é mais complexa, levando à remodelação dos cantos curvos para ortogonais, demonstrado na imagem 7.

Imagem 7: Representação da remodelagem no Rhinoceros 3D.



Fonte: Autoria própria.

A parametrização tem grande importância neste processo pois, os programas paramétricos permitem alterações nos parâmetros dos códigos formadores das peças e, uma vez mudados, podem alterar de maneira ágil e fácil o modelo pré-existente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos conceitos de tectônica e parametria apresentados, foi concluída a necessidade do desenvolvimento da noção de construção idealizado pelo viés da tectônica para poder projetar utilizando softwares computacionais, tornando assim o ato de fazer projeto mais prático, pois para se construir o código, por exemplo, é importante compreender todas as etapas do ato projetual. Ambos os conceitos auxiliaram no projeto e na prototipagem dos módulos reproduzíveis, sendo que o primeiro em relação à estrutura e o segundo na variação de características do módulo.

A ferramenta manual e digital para projetar tem sua importância, focalizando em quais momentos cada uma deve ser utilizada. Por ambas fazerem parte do ensino e do aprendizado da arquitetura, o saber fazer é muito importante. O ato projetual tem se modificado desde o advento e inserção da tecnologia e dos softwares computacionais neste processo. Neste ponto, a pesquisa apresentou a possibilidade do resgate de técnicas antigas através do uso das novas ferramentas para a materialização, a partir do momento em que a carpintaria

japonesa antiga é capaz de ser reproduzida de maneira fiel ao que era até em então, mantendo seu uso até os dias atuais nos mais diversos ramos da arquitetura.

Os softwares computacionais auxiliam na hora de projetar, economizando tempo de trabalho, porém, é necessário o conhecimento específico do assunto, o “know how” da construção e saber projetar utilizando este auxílio, tanto para a realização dos códigos, como para questões estruturais pois, estes programas desenham as condições de projeto a partir das regras que lhe são dadas pelos códigos. Embora estas ferramentas estejam atuando sobre o processo, não há nenhuma etapa que não dependa da decisão do projetista uma vez que ele quem dará seu estilo e objetivos aos códigos que serão aplicados no programa.

Para melhor compreensão do funcionamento dos encaixes japoneses em madeira, foi realizado um estudo aprofundado sobre o tópico no qual foi possível entender as qualidades da prática em facilitar e dinamizar uma construção, por conta do não uso de adereços para estrutura, sendo exclusivamente peças de madeira cortadas em máquinas CNC e encaixadas com perfeição. Esse tipo de fabricação pode auxiliar projetos e a construção civil, tendo seu uso em crescente presença na arquitetura, se mostrando como uma prática do futuro, associando a tecnologia à técnica do passado japonês.

Os encaixes produzidos e reproduzidos, além dos estudos realizados, serão disponibilizados como *open source*, do mesmo modo que são realizadas as estruturas e casas do WikiHouse, para poder gerar conhecimentos para todos, ampliando o uso dessa tecnologia capaz de gerar benefícios para toda a sociedade.

6. REFERÊNCIAS

ARCHITECTURE for the people by the people. [s.i.]: Ted Talks, 2013. (13 min.), son., color. Legendado. Disponível em: <https://www.ted.com/talks/alastair_parvin_architecture_for_the_people_by_the_people?language=pt-br#t-2835>. Acesso em: 25 out. 2016.

AMARAL, Izabel. **Quase tudo que você queria saber sobre tectônica, mas tinha vergonha de perguntar**. Pós. Rev Programa Pós-Grad Arquit Urban. FAUUSP. 2009, n.26, pp. 148167.

CANCIGLIERI JUNIOR, Osiris; SELHORST JUNIOR, Aguilar; SANT'ANNA, Ângelo Márcio Oliveira. **Método de decisão dos processos de prototipagem rápida na concepção de novos produtos**. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/gp/v22n2/0104-530X-gp-222-345.pdf>>. Acesso em: 04 fev. 2017.

CECÍLIA, Bruno Santa. **Tectônica moderna e construção nacional**. Disponível em: <<https://revistamdc.files.wordpress.com/2008/12/mdc01-txt02.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2016.

FRAMPTON, Kenneth. **Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture**. Cambridge: Mit Press, 1995. 448 p.

FLORIO, Wilson. **Modelagem Paramétrica no Processo de Projeto em Arquitetura**. In: Workshop Brasileiro de Gestão do Processo de Projeto na Construção de Edifícios, 9, São Carlos. Artigo... São Carlos: USP, 2009, p. 571-582.

GORNI, Antonio Augusto. **Introdução à prototipagem rápida e seus processos**. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/protrap.html>>. Acesso em: 19 jul. 2016.

GROS, Jochen. **50 Digital Wood Joints**. Disponível em: <<http://www.flexiblestream.org/project/50-digital-wood-joints>>. Acesso em: 26 set. 2016.

HENRIQUES, Gonçalo Castro; BUENO, Ernesto. **Geometrias Complexas e Desenho Paramétrico**. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/drops/10.030/2109>>. Acesso em: 19 jul. 2016.

HORTA, M.: 2009, **Arquitetura paramétrica na sede da UMCP - SUBdv**. São Paulo, 2008/2009. Revista aU, edição 181, abril/2009.

MEREDITH, Michael. **From Control to Design: Parametric/ Algorithmic Architecture**. Barcelona, Actar-D, 2008.

MITCHELL, William J.; MCCULLOUGH, Malcolm. **Digital Design Media**. 2. ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 1995. 512 p.

OLIVEIRA, Marina Rodrigues de; FABRÍCIO, Márcio Minto. **Modelos físicos e virtuais como ferramentas do ensino de projeto de arquitetura: relato de uma vivência**. 2009. Disponível em: <https://cumincad.architecturez.net/system/files/pdf/sigradi2009_816.content.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2016.

REAS, Casey; MCWILLIAMS, Chandler; LUST. **Form+code in design, art, and architecture**. Princeton: Princeton Architectural Press, 2010. 176 p.

SANTOS, Bruna dos; COELHO, Tânia Maria; ASSAD FILHO, Nabi. **PRODUÇÃO DE PLÁSTICO BIODEGRADÁVEL A BASE DE AMIDO MODIFICADO**. Disponível em: <http://www.fecilcam.br/nupem/anais_ix_epct/PDF/TRABALHOS-COMPLETO/Anais-ENG/05.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2016.

SEKLER, Edward. **STUDIES IN TECTONIC CULTURE**. Cambridge: Mit Press, 2001. 448 p.

SOTO, Jorge. **O plástico no planeta o uso consciente torna o mundo mais sustentável**. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/download/Principal/21103?file=Cartilha_Braskem.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2016.

SUMIYOSHI, Torashichi; MATSUI, Gengo. **Wood Joints in Classical Japanese Architecture**. Japão: Kajima Institute Publishing Co., 1989. 69 p.

Contatos: cadufernandes@gmail.com e guilherme.michelin@mackenzie.br