REVISTA DESIGN & TECNOLOGIA
ISSN: 2178-1974
2019, Vol. 09, No. 18
DOI 10.23972/det2019iss18pp01-21

PGDESIGN
www.pgdesign.ufrgs.br

Tectônicas Digitais: A (In) Tangibilidade no Processo de Projeto em Arquitetura

Caio Augusto Rabite de Almeida[1]; Fernando Tadeu de Araújo Lima[2]; Marcos Martins Borges[2]

1 *Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (NPGAU), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil*

2 *Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído (PROAC), Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil*

RESUMO

Este artigo é resultado de uma pesquisa de Mestrado que se centrou na investigação da relação entre o estudo das tectônicas em paralelo com a evolução das técnicas e conhecimentos envolvidos no processo de projeto em Arquitetura. Sua importância como teoria de projeto é a de propor uma maneira de se falar sobre o ambiente construído em que o seu uso, estrutura e experiência estão explicitamente relacionadas à materialização e à construção deste ambiente construído. O conceito da Tectônica em Arquitetura desenvolve-se na própria origem do ofício da tarefa de construção, na medida em que a produção de edificações estava vinculada a profissionais que detinham um conhecimento sobre a forma de se construir e projetar. Nos últimos anos, as novas tecnologias digitais e os processos de produção pós-industriais surgiram como ferramentas de apoio que modificam a maneira de se projetar, avaliar e produzir projetos de arquitetura e design, incorporando-se assim uma lógica digital ao conceito tradicional de tectônicas. Como consequência desse paradigma, surge a necessidade de uma investigação das possíveis implicações desses desenvolvimentos através do progressivo aumento da utilização de sistemas digitais. Essa abordagem emergente proporciona novas formas de se produzir e pensar o projeto e o processo de arquitetura, mas ao mesmo tempo indica muitas outras questões que se apresentam. A metodologia e os resultados deste trabalho, são direcionadas no emprego de softwares computacionais paramétricos para a proposição de um experimento intitulado pavilhão Waffle, que foi realizado com a combinação de variáveis e parâmetros digitais e construtivos, objetivando perceber o potencial em que cada um desses diversos níveis se combinam, em uma série de campos de estudos e em um cruzamento multi escalar de arquitetura, engenharia, computação, análises físicas e experimentações de design e construção.

PALAVRAS-CHAVE
Tectônicas Digitais;
Processo de Projeto;
Arquitetura Paramétrica;
Fabricação Digital

Digital Tectonics: The (In) Tangibility In The Architecture Design Process

ABSTRACT

This paper is the result of a master's research that focused on the investigation between the study of technologies in parallel with the evolution of the techniques and the knowledge involved in the architecture design process. Its importance as a design theory is to propose a way of talking about the built environment in which its use, structure and experience are explicitly related to the materialization and construction of this built environment. The concept of Tectonics in Architecture develops at the origin of the craft of construction, as the production of buildings was linked to professionals who had a knowledge of how to build and design. In recent years new digital technologies and post-industrial production processes have emerged as supporting tools that change the way we design, evaluate and produce architectural and design projects, thus incorporating a digital logic into the traditional concept of tectonics. As a consequence of this paradigm, there is a need for an investigation of these developments and their possible implications through the increased use of digital systems.This emerging approach provides new ways of producing and thinking about the design and architectural process, but at the same time points to many other issues that are uncovered. The methodology and results of this work are directed to the use of parametric computational software for the proposition of an experiment called Waffle Pavilion, which was performed with the combination of digital and constructive variables and parameters, aiming to perceive the potential in which each of these different levels combine itself in a series of study fields and in a multi-scalar crossover of architecture, engineering, computing, physical analysis, design and construction experiments.

KEYWORDS
Digital Tectonics;
Design Process;
Parametric Architecture;
Digital Fabrication

CONTATO: Caio Augusto R. Almeida – *caioaugusto.arq@gmail.com,*

© 2019 – Revista Design & Tecnologia

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho é resultado de uma pesquisa de mestrado que versou sobre o conceito de tectônica e de suas evoluções, que foram delimitadas no âmbito da pesquisa em questão como as maneiras de se abordar um ambiente construído, em um contexto em que o uso, a estrutura e a experiência estão explicitamente relacionados à materialização e à construção deste ambiente. A pesquisa centrou-se na investigação das relações entre a associação da modelagem computacional e de recursos de fabricação digital, de maneira a verificar suas implicações nas formas contemporâneas de se projetar e produzir objetos em arquitetura, sejam estas construções físicas, mobiliários ou componentes de um edifício.

Essas novas formas de produção e do emprego de técnicas diversas, potencializadas pelo uso da tecnologia de modelagem e fabricação inseridas dentro do processo, permitem novas explorações de conceitos e formas que trazem o projetista novamente como um agente intimamente relacionado com a tectônica de sua execução. Ou seja, não apenas como um desenhista que explica suas ideias e se afasta do processo nas etapas de construção e/ou materialização destas, mas também, e principalmente, como a figura do arquiteto enquanto "construtor-mor", responsável por conhecer a materialidade e a capacidade de se executar as ações a serem realizadas, baseando-se em parâmetros e conceitos digitais que podem extrapolar os limites entre o físico e o virtual.

Este arquiteto construtor, tem origem, de acordo com Lima et al. (2013), durante o período Pré-Renascentista, onde existia uma divisão entre dois tipos de artes, sendo estas as Artes Liberais e as Artes Utilitárias. A arquitetura especificamente se encontrava dentro da categoria de Artes Utilitárias (ou Artes da Necessidade), e eram geralmente produzidas por escravos que não frequentavam as academias e formavam seu conhecimento de maneira empírica junto a outros mestres mais experientes.

Já na Idade Média, as artes Liberais passaram a ser ensinadas nas Universidades e a incluir outros conhecimentos além dos práticos na formação de construtores de arquitetura. No entanto, ainda existia, naquela época, a figura do construtor-mor semelhante à da Antiguidade Clássica (LIMA et al, 2013), em que arquitetos pioneiros não estavam somente ligados ao projeto, mas também à própria execução da sua ideia no canteiro de obras, ficando responsáveis por todas as etapas da construção. No Renascimento, essa lógica do arquiteto construtor se altera. Com o sistema de notação de Projeto em projeções cilíndricas ortogonais desenvolvido por Leon Battista Alberti (sistema que ainda é usado atualmente), promoveu-se, de acordo com Lima et al. (2013), a separação do responsável pelo projeto do responsável pela execução. Essa ruptura no pensamento existente até então, transformou o ato de arquitetura em uma atividade prescritiva, caracterizada pela possibilidade de se antever o edifício.

Essa dedicação maior ao projeto e aos desenhos que o representam condicionam o arquiteto, como informa Kolarevic (2005), a "projetar somente o que se poderia desenhar e a desenhar somente o que se poderia construir", se referindo ao conceito de Mundo Projetual proposto por William Mitchell (2008).

Este "Mundo Projetual" é delimitado por meio dos instrumentos que um arquiteto se utiliza para fazer exploração de possíveis formas, se adequando ao tipo de tarefa a ser desempenhada e introduzindo as ferramentas e os procedimentos apropriados para tal.

Neste contexto, é possível observar que o desenvolvimento de técnicas e recursos historicamente resultou em novas maneiras de entender, conceber e consequentemente produzir Arquitetura. Para Nardelli (2007), os saltos de paradigmas de produção, conceito e ensino em arquitetura, são motivados por transições tecnológicas, que promovem uma virtualização da arquitetura e de métodos representativos, possibilitando a criatividade de formas e soluções que foram abandonadas no Renascimento.

Sendo assim, tecnologias como a da fabricação digital combinada com o design computacional, podem reconfigurar radicalmente a relação entre a concepção e a produção de arquitetura, criando uma inter-relação constante entre o que pode ser concebido e o que pode ser construído. Os chamados processos generativos digitais, que conforme SHEA et al. (2005) são focados na criação de novos processos de design que são realizados através da utilização das capacidades atuais de computação, estão abrindo novos territórios na exploração de conceitos, formas e tectônicas, articulando a morfologia e a topologia arquitetônica focada em propriedades emergentes e em suas adaptações. Isto habilita o projetista a produzir e a executar formas e soluções complexas que até há pouco tempo, não poderiam ser materializadas com os meios tradicionais.

Conforme Kolarevic (2005, p.7) o debate sobre o uso da computação na arquitetura demonstra a inovação tecnológica da sociedade contemporânea e que esses processos digitais generativos abrem novos territórios para novas explorações, de ordem conceitual, formal e tectônica.

O artigo visa então a realizar uma apresentação dos resultados obtidos da pesquisa principal - as tectônicas digitais - e que serão apresentadas no decorrer deste, para que posteriormente faça-se uma descrição da metodologia com as motivações, os objetivos e o processo abordado no projeto final que articula e exemplifica o método empregado na investigação. Portanto, este trabalho divide-se em três principais momentos considerados: revisão bibliográfica e atual estado da arte; metodologia de investigação, e; experimentações.

Assim, esta pesquisa amparou-se, primeiramente, em uma revisão bibliográfica com o propósito de investigação de um cenário que possibilite o entendimento dos conceitos e das técnicas relacionados aos conteúdos abordados no presente trabalho. Para tal, o recorte busca apresentar no que consiste a aqui chamada "tectônica digital" e quais elementos e processos tecnológicos e conceituais estão associados à sua realização.

2. TECTÔNICAS "CLÁSSICAS"

A introdução da tectônica na Arquitetura e no Urbanismo é uma exploração da poética da construção. A teoria tectônica é uma filosofia integrativa que examina as relações formadas entre design, construção e espaço enquanto cria ou experiência-se uma obra de arquitetura.

A palavra "tectônica" tem sido utilizada por teóricos da arquitetura há vários séculos, mas ao longo de todo esse tempo houve muitas opiniões diferentes sobre o que o termo representa. No presente trabalho, o termo "tectônica" será primeiro definido através da análise de diferentes teorias arquitetônicas e, posteriormente, será articulado com a arquitetura digital contemporânea. Através desta discussão, pretende-se alcançar uma compreensão dos termos "tectônica" e da arquitetura digital e posteriormente, sugerir como eles juntos podem formar um tipo de tectônica, a tectônica digital.

O termo arquitetônico utilizado para se descrever o interesse em detalhes de uma construção é denominado "tectônica". A própria palavra arquitetura, é etimologicamente derivada deste termo, o que sugere, portanto, que a tectônica está inserida intimamente no ofício da profissão. Oriunda do grego antigo, o termo tectônica deriva da palavra "*tekton*", que

significa carpinteiro ou construtor que trabalha com materiais mais primários.

De acordo com Kenneth Frampton (1997), a palavra grega aparece nos escritos de Homero, ao qual faz alusão à arte da construção em geral. A conotação poética do termo surgiu primeiramente com Sappho, onde a "*tekton*", a carpintaria, assume o papel da poética do saber fazer. No século V. A.C a palavra passa posteriormente a ter o significado para de algo mais específico e físico como a carpintaria, para uma noção de significado de um fazer mais geral, envolvendo a ideia de "*poiesis*" das evoluções das técnicas construtivas. Ainda de acordo com Frampton, eventualmente a continuidade do papel da tectônica nas edificações levou a emergência do mestre construtor de arquitetura, e a tectônica manteve um lugar central na disciplina e em como os arquitetos inovam com materiais, processos e montagens.

Como citado anteriormente a palavra (tectônica?) é derivada do grego, onde a mesma possui dois significados principais relacionados a área que exemplificam bem o significado dela, estrutura e significado. Segundo Anderson & Kinkergaard (2006), ela estaria vinculada à teoria pertinente da estrutura interna de uma obra, e a formação e união dos elementos que compõem essa forma. Diversos teóricos tais como tais como Karl Bötticher, Gottfried Semper, Eduard Sekler, e Kenneth Frampton, vêm discutindo o termo e os conceitos que implicam na chamada "tectônica da arquitetura".

Em um estudo de 1973 denominado "estrutura, construção e tectônicas", Eduard Sekler definiu no seu trabalho a tectônica como uma expressividade acerca das resistências estáticas das formas construtivas de tal maneira que a resultante dessa expressão não poderia ser desassociada em termos de estrutura e construtibilidade sozinhas.

O termo viria inevitavelmente a aspirar também características estéticas relacionadas às tecnologias e de materiais, como cita Adolf Heinrich Borbein em sua publicação de 1982: Tectônica poderia ser compreendida como a arte do "encaixe". A palavra "arte" aqui deve ser entendida como responsável por compreender a chamada "*tekne*", e, portanto, não somente vinculada à construção e montagem de peças, mas também se estreitando com o termo que diz respeito à antiga compreensão da palavra, a tectônica que tende à construção de um objeto artesanal ou artístico, singular e próprio sobre sua maneira de fazer.

Já Botticher (1843), um dos pioneiros a tratar sobre o tema e a conceituação do termo, a tectônica poderia ser definida segundo ele como um significado de um sistema no qual cada parte completa um todo, cada detalhe construtivo, cada particularidade da edificação, cada jogo de textura, luz ou volume seria uma característica que viria a compor a tectônica final, como por exemplo, as colunatas gregas de um templo, ou a nave central e o jogo de luz e sombra de uma catedral gótica. Para Botticher (1843), a tectônica abrange definições características de uma espécie de sistema que seria responsável por ligar todos os elementos de um edifício em conjunto a um todo. Segundo Hartoonian (1994) o ponto principal do tratado de Bötticher sobre tectônica é que todas as obras de arquitetura podem ser divididas em *Kerneform* (estrutura) e *Kunstform* (representação).

Essas ideias de Botticher originam-se no estudo da construção helênica (termo aplicado à arte e arquitetura gregas ou de inspiração grega a partir do final do século IV até o final do século I a.C. e os princípios com os quais os gregos projetaram suas maiores obras), ele alega que essa "Era" da arquitetura era inigualável em sua capacidade de transmitir a essência subjacente de um trabalho arquitetônico através da expressividade da ornamentação com a qual estava revestida, como ilustrado na Figura 1.

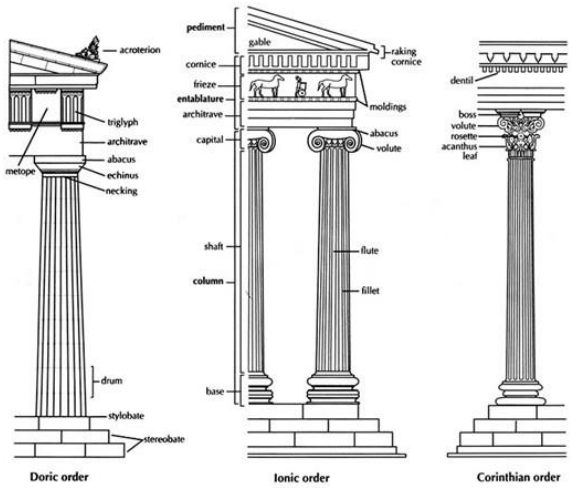


Figura 1 Tipos de colunas gregas clássicas (dórica, jônica e coríntia). Fonte: https://bit.ly/2qIDkbl

Sob essa luz, é interessante observar o conceito de tectônica, definido por Gotfried Semper, que qualificou uma compreensão contemporânea do conceito. Semper (1989), então, realiza uma divisão entre as questões técnicas e simbólicas, mas reforça também a importância da coerência entre o material e o método de fabricação. O design tectônico mantém uma ideia criativa, que atua como um princípio de direcionamento e estruturação, ele parte de um princípio geral que materializa as construções em estruturas coerentes. Seguindo o segundo ponto, vale a pena observar que o trabalho tectônico em uma definição "semperiana" pode ser considerado como uma criação artística - tendo apenas um foco secundário no conteúdo funcional da arquitetura.

Na década de 90, Kenneth Frampton, traz de volta as ideias da tectônica em torno da arquitetura de volta ao centro das atenções. Frampton (1997) propõe que a tectônica é um meio para que se possa revelar a essência de uma construção, das quais seria possível sugerir constituições lógicas, que teriam como objetivo analisar as estruturas do objeto arquitetônico em estudo, e assim, torná-lo imediatamente compreensível.

Ainda de acordo com Frampton, a articulação entre elementos arquitetônicos e materiais e a maneira em que se encontram, faz com que assumam um papel fundamental na narração da lógica que vai desde a concepção até a construção final. Nesta articulação, a história dos materiais, os avanços tecnológicos e disponíveis em determinada época, estruturas e técnicas disponíveis estão incorporadas diretamente, traduzindo-se assim como a tectônica do objeto em si, e tornam-se o elemento mais tectônico de um artefato arquitetônico.

Essa ligação íntima entre a criação de soluções físicas e a criação de significado constitui o núcleo do pensamento tectônico. Entendendo as potencialidades dos materiais e dos métodos de construção utilizados e transformando-os em soluções de projeto arquitetônico - que refletem a lógica da construção - os processos de construção de um prédio e sua aparência são unificados.

Uma abordagem tectônica da construção da arquitetura não deve ser meramente interpretada com relação à escolha de um sistema de construção; à interpretação da tectônica deve ter como base a "poética da construção" em associação com muitas variáveis (K. Frampton, 1997).

Anne Beim (2004) em seu livro *Tectonic Vision in Architecture*, argumenta que ao falar sobre a tectônica de um edifício, o foco será então sobre o significado embutido na

construção específica, uma vez que é interpretado tanto pelo arquiteto projetista quanto pelo usuário. A construção e a forma tornam-se elementos centrais no processo de projeto, bem como na percepção do resultado real do projeto. O pensamento da tectônica por si só envolve os potenciais e qualidades, ambos encontrados na gênese da solução de construção e na materialização da estrutura final do edifício.

O estudo da tectônica arquitetônica é um esforço sistêmico. Da afirmação de Kenneth Frampton de que a tectônica é "a ampliação formal da presença estrutural em relação à montagem da qual faz parte" às teorias de Gottfried Semper de que a origem da arquitetura não é a construção, mas a representação visível do espaço fechado proveniente de experiências humanas; à teoria do *kernform* ontológico (forma de trabalho) de Karl Botticher e seu revestimento do *kunstform* representacional (forma de arte). É claro ver, que os teóricos não concordam em algumas partes sobre o que é a tectônica.

Portanto, é interessante descobrir se existe ou não um centro de interesse que os teóricos têm em comum. Para começar, todos os teóricos sugerem uma divisão da arquitetura em uma parte concreta e uma parte mais abstrata. Para a parte concreta pertencem a construção, método e material, enquanto que na parte abstrata pertencem a estrutura, conceito, representação e intensificação. A visão da arquitetura através de uma lente tectônica busca retratar a integração poética da montagem, materialidade, representação, espaço e ambiente.

3. TECTÔNICAS DIGITAIS

Através da história, o papel clássico do “construtor principal” se diluiu em várias outras ramificações. Ao expandir o conhecimento sobre arquitetura e construção, esse papel foi assumido por especialistas que se concentram em disciplinas separadas. A inteligência de uma estrutura não faz mais parte do conhecimento somente de um indivíduo. Esta especialização significa que arquitetos e engenheiros podem se concentrar mais em suas tarefas. No entanto, a divulgação do conhecimento em várias partes pode retardar o processo de design, uma vez que um processo de projeto tem um forte caráter cíclico, eles terão que se comunicar regularmente para orientar todo progresso na direção certa, e a indevida coordenação e comunicação pode resultar em um processo de design lento e ineficiente.

Nas discussões contemporâneas da arquitetura digital, a tectônica é um termo recorrente no discurso de quem a produz.

Para Neil Leach (2004), um dos pioneiros a fazer uso do conceito de tectônicas em conexão com o movimento de design baseado em ferramentas digitais a tectônica digital pode ser compreendida de uma maneira prática, como um uso sistemático de relações geométricas e espaciais usadas em combinação para a formação de detalhes e componentes (LEACH, 2004).

Já para Beesley e Seebohm (2000) as tectônicas digitais significam resumidamente, em um foco em montagens de elementos de construção mediados por processos realizados digitalmente, integrando o uso de softwares de modelagem e projeto com métodos de construção variados.

Estas arquiteturas digitais estão mudando profundamente os processos de projeto e construção. Ao integrar o design, análise, fabricação e montagem de edifícios em torno de tecnologias digitais, arquitetos, engenheiros e construtores tem a oportunidade de reinventar o papel de um "mestre-construtor" e reintegrar as disciplinas atualmente separadas de arquitetura, engenharia e construção em um setor relativamente transparente e colaborativo, reduzindo assim a "lacuna entre o design e a produção que se abriu quando os designers começaram a fazer desenhos", como foi observado por McCullough (1995).

Segundo Christiansen (2014) podemos dividir o processo de formação da tectônica em três partes: primeiramente desenvolver uma ideia para uma forma, ou pelo menos, uma forma pretendida. Em segundo lugar, é necessário escolher um material que concretize a forma específica. E por fim, o arquiteto deve identificar uma possível ferramenta de fabricação com o potencial de iniciar a forma projetada e especificada no material selecionado.

A introdução do uso de computadores não isenta o arquiteto das responsabilidades de criação da forma e de suas tectônicas, ou seja, o processo altera na medida em que as considerações estéticas, funcionais, estruturais entre outras, são levadas em conta e que estes aspectos que servem como diretrizes, são inseridos pelo projetista através do design computacional que auxilia na solução e adequação dessas necessidades enriquecendo o processo.

As principais questões abordadas referentes ao termo são as interações entre material e tipo de construção e sua relação com a comunicação das lógicas do processo escolhido. O primeiro deles trata dos aspectos ontológicos da construção, e os últimos à representação. Com a emergência das ferramentas digitais direcionadas à arquitetura, a tecnologia assume um novo papel que adiciona novos conceitos tanto em materialidade quanto em processo nessa forma de se definir “tectônica” em arquitetura.

De acordo com Rocker (2006), no presente tempo, o ornamento parece estar de volta à arquitetura e o design computacional cumpre um papel ao qual é muito utilizado tanto no design da arquitetura quanto na estrutura e componentes que a formam.

Patrik Schumacher (2017) incorporou recentemente o termo “tectonismo”, que surge como um novo ramo de estilo inserido no pensamento paramétrico que permite uma maior variedade expressiva e formal. Isso torna-se possível graças a uma gama crescente de ferramentas digitais para análises de diversas ordens como estruturais e físicas, vinculadas diretamente à fabricação. Isso não significa necesseriamente que não exista a necessidade de que arquitetos colaborem com outros profissionais, mas permite que eles adquiram intuições mais confiáveis sobre as lógicas dessas outras disciplinas como engenharia, fabricação e logística. Isso só tende a aumentar a sua capacidade de produzir trabalhos que consigam combinar com sucesso a comunicação e a funcionalidade social da arquitetura com a integridade técnica (SCHUMACHER, 2017).

Esse denominando tectonismo está incorporando uma série de racionalidades técnicas que asseguram tanto maior eficiência quanto maior rigor morfológico, enquanto mantém graus suficientes de liberdade de projeto para lidar com contingências programáticas e contextuais. Isso porque os princípios que o tectonismo utiliza são inerentemente abertos e plurais, esse rigor adicional vem da variedade tectônica adicional e, portanto, oferece um novo repertório morfológico e construtivo. Isso permite que os designers forneçam uma identidade única e reconhecível para projetos individuais, sem descender à invenção de forma arbitrária (SCHUMACHER, 2017).

Reconhece-se aqui que os modelos digitais possuem atributos inerentes, e que tal constituição propicia novos modos de produção. A atividade de projeto é um desses possíveis sistemas de produção e, portanto, um dos territórios mais pertinentes para se compreender, dentro do campo disciplinar da Arquitetura, modificações no agenciamento das ideias e conhecimentos.

O computador assume assim um papel fundamental na produção dessa tectônica, não apenas como instrumento de

desenho e elaboração de projeto, mas responsável por uma característica inerente aos detalhes e as formas de se produzir esta arquitetura. A digitalização das ferramentas e do processo de design atualmente mudou o pensamento conceitual tanto na arquitetura real (física) quanto na virtual. Evidenciando que o novo paradigma do processo de design emergente passa pela aplicação dessas tecnologias.

Os muitos programas utilizados para o desenvolvimento de projetos e experimentações tornam evidentes também a adoção de técnicas pertencentes a outras indústrias e de disciplinas diversas que possam contribuir na produção dos modelos digitais arquitetônicos, o processo é cada vez mais interdisciplinar.

A tectônica digital é, portanto, um conceito que realiza uma nova abordagem quando se trata de metodologias e conceitos do design arquitetônico atual.

Ao mesmo tempo, quando comparamos e consideramos os termos tectônica e digital, pode-se pressupor que os mesmos se contradizem (LEACH, 2004). O digital é compreendido como algo virtual, abstrato e livre das leis da natureza, enquanto a tectônica é tátil, concreta, e como mencionada anteriormente, surgiu como uma técnica frente a materialidade dos elementos naturais.

Pode-se concluir com base nestas concepções que as sugestões de tectônicas digitais não são muito diferentes das descrições anteriores dos teóricos clássicos da tectônica, principalmente em relação à interação entre construção, material e expressão, mas há uma nova ênfase em relação ao processo, através do qual um projeto está sendo concebido por meio do uso de novas tecnologias e ferramentas. É aqui que a tectônica digital pode ser encontrada e aqui onde ela reside - no processo unificado onde o arquiteto se transforma em um moderno *"tekton",* que pode visualizar e controlar todos os aspectos tecnológicos e estéticos do edifício.

3.1 Diferenças Entre Tectônicas Clássicas e Digitais

As tectônicas foram usadas para cobrir superfícies arquitetônicas desde a antiguidade. Elas foram implantadas como elementos decorativos para acentuar certos recursos e comunicar significado e estilo. Nas últimas duas décadas entretanto, a revolução digital instigou um novo processo de design através do qual emergiram novas tipologias de superfícies e padrões arquitetônicos. A tectônica começou a adquirir um novo papel na forma do objeto, ultrapassando o seu papel decorativo simbólico histórico em dispositivos digitais especiais; correlacionando-se com a forma de propriedades estruturais e ambientais.

A integração dessas ferramentas permitiu ao arquiteto gerar e controlar informações complexas derivadas de uma variedade de fontes. Conseqüentemente, surgiu uma ordem arquitetônica mais complexa como reflexo de sofisticadas estruturas adaptativas. Contrariamente ao design arquitetônico tradicional, onde as ferramentas digitais foram usadas para apresentação e documentação, os métodos de design paramétrico emergentes permitem que o arquiteto integre a computação no processo de design para estabelecer conexões e dependências entre os elementos. É uma característica intrínseca de qualquer processo de design ter níveis de detalhe. Ou seja, quanto mais evoluído é o design, mais detalhado ele precisa ser descrito.

A partir dessas comparações, é possível distinguir as diferenças entre as tectônicas tradicionais e digitais, tal como esta é compreendida atualmente. A tectônica tradicional é mais tangível e concreta, com ênfase principalmente no detalhamento em relação aos materiais e construções usados na construção, enquanto a tectônica digital enfatiza as iterações e a interação entre aspectos estéticos e técnicos no processo de formulação dos conceitos, sendo mais abstrata e orientada para o processo em si. Este é o núcleo da definição de tectônica, explicando o que é o conceito de arquitetura. A arte de construir é uma forma de arte que surge como uma resposta ao contexto, à ciência e às forças.

Esse é o cerne da definição da tectônica quanto conceito em arquitetura. A arte de se construir enquanto resposta ao contexto, à técnica, aos materiais e tecnologias para dar forma ao objeto, introduz e altera, devido às novas possibilidades que estão nas ferramentas digitais, e assim, a tectônica também muda. Essa abordagem mostra uma nova maneira de pensar sobre o projeto arquitetônico, mas ao mesmo tempo indica também novas tarefas a serem resolvidas.

Como definem Anderson & Kinkergaard (2006), a tectônica digital é, no entanto, não apenas o desafio clássico de conciliação das tradições e técnicas de construção com o tipo de material a ser usado, mas também uma questão de processo integrado. A tectônica digital não é, portanto, apenas uma adição de arquitetura digital ao termo tradicional da tectônica, mas uma nova maneira de se considerar a arquitetura como um meio lógico resultante de um processo híbrido entre tangível e intangível, e que revela assim, a identidade do objeto e seu contexto. O significado mais profundo da arquitetura e da tectônica ainda é o mesmo - ainda deve revelar a natureza do edifício e seu contexto. O contexto técnico, no entanto, é alterado devido às novas possibilidades que estão nas ferramentas digitais e, portanto, a noção de tectônica também tem que mudar. Dessa forma as definições de Tectônica de Bötticher, Semper, Sekler e Frampton já não são suficientes ainda que pertinentes como princípio, outro aspecto deve ser adicionado - um processo integrado de *form finding* direcionado por essas novas ferramentas computacionais.

Considerando estes diferentes aspectos dos conceitos sobre o digital e a tectônica, sugere-se que a tectônica digital se dê como articulação do concreto e do abstrato. O termo tradicional da tectônica não é suficiente, ao avaliar a arquitetura digital concebida, pois não detecta o processo "atectônico". O processo tectônico tornou-se mais relevante, desde o surgimento de computadores, já que agora é possível criar uma construção lógica para todas e cada uma das formas desejáveis (ANDERSON E KINKERGAARD, 2006).

4. EVOLUÇÕES DAS TECNOLOGIAS E PROCESSOS DE DESIGN – O DESIGN PARAMÉTRICO

O design paramétrico se estabeleceu como uma tendência arquitetônica muito estudada e praticada dentro do cenário de produção contemporâneo. O termo faz referência a uma prática de modelagem digital que combina uma série de variantes de *design* e geometria cujas relações entre si são definidas através de uma ou várias relações matemáticas (parâmetros) que formam um sistema que permite a geração de infinitas formas, que são ao mesmo tempo relacionadas, mas distintas entre si.

O design paramétrico, diferentemente do que muitos pensam, está presente no design e na arquitetura desde seus primórdios, porém de maneira analógica (TERZIDIS, 2006). A investigação da grande parte da arquitetura renascentista, por exemplo, frequentemente mostra diagramas de elementos clássicos da arquitetura (colunas, arcos, etc.) em que as dimensões não são classificadas com valores fixos, mas com expressões que definem estes valores como funções de alguma variável importante, tais como o diâmetro da coluna. Assim, atribuindo valores as variáveis independentes, e avaliando as expressões, um projetista poderia construir diversos objetos partindo de uma matriz conceitual. Ainda assim, foi somente

com a utilização da computação em design e arquitetura que o termo “paramétrico” passou a ser popularmente conhecido, tendo seu início na década de 60 com o começo do uso de softwares de programação aliados a projetos.

Posteriormente esse conceito de parametria, em que cada entidade poderia ser modificada em qualquer uma das vistas e as ações ocorreriam diretamente no projeto foram sendo cada vez mais parte dos softwares CAD, alterando todo o processo de projeto e suas diversas etapas, e utilizando-se de como principal máxima: “desenhar mais em menos tempo”.

Esse design atual passa por dois fatores básicos que estão ligados a essa nova forma de se projetar utilizando-se de recursos computacionais, que são eles algoritmos e programação.

A programação está relacionada a codificação de um algoritmo utilizando uma linguagem de programação, sendo divididas geralmente em quatro etapas:

1. Ordem sequencial: as linhas de código são lidas pelo computador e são executadas de maneira sequencial e segmentadas.
2. Condicionais: condições são elaboradas para direcionar e restringir as ações realizadas pelo programa.
3. Iterações: instruções são repetidas até se obter o resultado desejado.
4. Variáveis: dados variáveis são implementados para proporcionar cálculos dinâmicos dentro do código a fim de causar algum efeito durante sua execução.

Já os algoritmos são o resultado de descrições detalhadas de geométricas complexas e euclidianas e as suas transformações baseadas em coordenadas. A partir das definições fornecidas, é possível concluir que design paramétrico é a área do design em que o produto projetado é concebido através da definição de um conjunto de parâmetros vinculados a atributos desse produto. Atualmente, sistemas paramétricos estão relacionados ao uso de ferramentas digitais, tanto 2D quanto 3D, capazes de modelar formas diversas de acordo com os parâmetros fornecidos pelo designer. (VIEIRA, 2014)

Uma definição mais simples é encontrada no dicionário Oxford, que estabelece algoritmo como ‘um processo ou conjunto de regras a ser seguido no cálculo ou em outras operações de resolução de problema, especialmente por um computador”. O algoritmo não é usado somente no contexto da computação. Ele define qualquer sequência de instruções, como uma receita de bolo ou um manual de montagem. No contexto da programação, o processo de transformar e segmentar uma ideia em instruções não é um processo intuitivo ao ser humano e por isso exige um alto grau de abstração. Essa abstração é um procedimento que precisa ser praticado com frequência para se tornar um hábito na atividade do designer envolvido com esse tipo de pensamento.

Conforme o (2001) as principais inovações da Arquitetura contemporânea ocorrem em estreita relação com o desenvolvimento e difusão da tecnologia digital, estabelecendo não só novas categorias, como também modos específicos de se conceber Arquitetura.

Ao contrário dos instrumentos tradicionais (como o desenho), a produção dos modelos digitais não tem o homem como criador único e restrito. Para desenvolver modelos e projetos em um ambiente digital, o arquiteto deve operar softwares que articulam dados e instruções lógicas que, concomitantemente, são processadas por um aparelho (o computador). Sendo assim, esse processo de projetar aponta para outra característica desses modelos, sua formação é baseada em informações, que não se caracterizam como reproduções estáticas de fruto de imaginação ou percepção como por exemplo o desenho manual, mas simulações que se fundamentam em perspectivas teóricas (cálculos, regras, operações, algoritmos, etc) através de inputs e outputs pertinentes a cada software (VELOSO, 2010).

Esses vários progressos entre projeto e produção relacionados à tecnologia e à forma de representação, transpuseram-se por outras áreas de conhecimento até o início de uso de softwares que foram elaborados inicialmente para projetos mecânicos, como navios, automóveis ou produtos. Quanto mais digital o processo se torna, menos intuitivo ele se apresenta, pois é necessário o conhecimento claro das informações para que estas sejam manipuladas pelos programas computacionais.

Nesse contexto, não se pode negar o fato dos meios tecnológicos acompanharem importantes mudanças nos processos criativos da Arquitetura. As revoluções tecnológicas e culturais, não sendo nada acidentais, percorrem um estreito caminho paralelamente aos conceitos da criação intelectual, estabelecendo interferências, questões e subsídios comuns. Especialmente no caso da Arquitetura contemporânea, muitas das inovações propostas não se restringem a referenciar iconografias científicas e tecnológicas, mas à constituição de modos específicos de transmissão, registro e produção do conhecimento.

Pesquisas atuais também mostraram que o desenvolvimento de novas ferramentas e ambientes de script também estão contribuindo para uma metodologia de design distinta e novas bases epistemológicas do conhecimento de design, resultando em novas formas de pensamento de design (Oxman & Oxman 2014). Referimo-nos a esses fenômenos emergentes como *Parametric Design Thinking* (PDT) (OXMAN, 2017). Termos e conceitos como esquema paramétrico, pensamento algorítmico e raciocínio paramétrico estão se tornando um importante corpo de novos conhecimentos na busca por uma teoria geral do PDT.

O pensamento de projeto paramétrico pode ser definido como tendo três características: pensar com abstração; pensar matematicamente e pensar algoritmicamente (Woodbury, 2010). A combinação dessas três características é o que pode ser definido segundo Oxman (2017) como o conceito de PDT.

Além disso, essa variedade de recursos de design permite uma representação mais clara das condições do projeto, da definição da forma e da sua concretização física. Ele revela características geométricas e construtivas que oferecem diversas possibilidades funcionais e estéticas. Uma característica significativa dessas tecnologias segundo Kieran & Timberlake (2004) tem sido a vinculação eletrônica de informações (a denominada "cadeia digital") no processo de projeto, definição de projeto e construção final, expressando assim os aspectos envolvidos e suas relações específicas, fornecendo uma plataforma para o trabalho colaborativo e uma diversidade de soluções e usos. No entanto, um maior grau de conhecimento técnico é, sem dúvida, envolvido, exigindo mais demandas na preparação e infraestrutura: para ensino, design e produção. Essas atividades de design devem ser integradas nas possibilidades atuais, mas também apresentam um desafio aos processos arquitetônicos tradicionais.

Paradoxalmente, à medida que o processo de projeto digital racionaliza o método, permite que novas relações sejam criadas no intuito de torná-lo menos determinístico. A manipulação das informações passa pelo filtro computacional, permitindo um aumento na quantidade e complexidade de variáveis consideradas, além da confiabilidade das respostas (fugindo da interpretação pessoal do projetista).

Com esse desenvolvimento contínuo de programas de Design assistido por computadores, os arquitetos estão fazendo alusão a um estado pré-renascentista, no qual eles eram considerados como um "mestre construtor". Já que no presente momento graças ao desenvolvimento de tecnologias de design computacional os arquitetos voltaram a se envolver mais diretamente em não apenas a projetar a forma de um edifício, mas comunicam-se diretamente com os diversos agentes envolvidos na produção coordenando todas as etapas do processo.

Esta afirmação evidencia como as tecnologias de design computacional e da informação desempenham um papel fundamental no ofício da profissão e se irradia por todos os campos por ela representados. A criação do espaço virtual implementou a quebra de paradigma do tempo e espaço tradicional. Algo que gera novas oportunidades na arquitetura: não apenas na necessidade de projetarmos ou tiramos partido deste ciberespaço, como também na medida em que essas novas ferramentas afetam o cotidiano das pessoas e, consequentemente, as premissas de projeto que incorporam todas estas complexidades e dinâmicas.

4.1 Modelagem Computacional na Arquitetura

No início dos anos 70, as indústrias manufatureira e aeroespacial começaram a usar os sistemas tridimensionais CAD baseados na modelagem de superfícies. Estes ramos industriais reconheceram que a representação precisava da geometria da peça e que poderia levar a uma análise automática do comportamento (estrutural, térmico, acústico, etc.) dela e auxiliar em sua fabricação. Entretanto, definir a forma tridimensional de uma peça mecânica era muito complicado e propenso a diversos erros. Assim, na metade dos anos 70 foram desenvolvidos os Sistemas de Modelagem de Sólidos, que permitiram que muitos objetivos do 3DCAD fossem concretizados como:

A. A representação exata de formas tridimensionais;
B. Derivação automática de algumas dimensões das formas, incluindo o volume e as áreas de superfícies;
C. Corte de seções, incluindo a derivação de propriedades das seções;
D. Geração automática de desenhos de peças ou conjuntos, com dimensionamento automático.

Sistema generativos de projeto foram descritos por Mitchell (1975), em seu artigo *"The theoretical foundations of computer-aided architectural design"*, como sendo dispositivos que são capazes de gerar soluções em potencial para um dado problema de projeto. As mais importantes estratégias do projeto generativo são as combinações, as substituições, a parametrização, as restrições de contexto, a aleatoriedade, a emergência, a otimização e a combinação de duas ou mais delas (CELANI, 2008).

Somente anos mais tarde (1980) foi que o conceito de sistemas generativos de projeto passou por uma apuração e sua gênese explicitada para ser aplicada à área de projeto. Os símbolos matemáticos e a substituição de caracteres foram trocados por formas geométricas. Antes de 1980 esses sistemas dificilmente eram implementados em computador, não apenas por que era necessário ter habilidades de programação altamente especializadas, mas também pelo custo do hardware, que deveria possuir uma interface gráfica adequada e grande capacidade de memória.

Os autores propõem uma programação que poderia ser usada como alternativa à prática de projeto convencional baseada na intuição. Composto de cinco princípios básicos: vocabulário de formas, relações espaciais, regras, forma inicial e projeto.

Todos baseiam-se no uso das linguagens de script existentes em programas de CAD e tiram vantagem das funções geométricas presentes nesses aplicativos.

Recentemente, alguns sistemas CAD introduziram ferramentas com capacidades de geração de modelos paramétricos sem que haja a necessidade, por parte do usuário, da elaboração de código simbólico para sua implementação. Nesses programas é utilizada a programação visual para a elaboração de diagramas que irão representar o algoritmo que gerará o modelo paramétrico. Em geral, este tipo de aplicativo permite uma automação limitada do processo de projeto, mas pode ser eficiente para a exploração de formas, por meio da geração automática de variações paramétricas. A maioria desses ambientes de programação permite criar algoritmos sem a utilização de código simbólico, e suas capacidades podem ser estendidas por meio do uso de scripts.

Os ambientes de programação visual para modelagem paramétrica podem ser comparados às linguagens de programação visuais, também chamadas de linguagem de programação diagramáticas. Essas linguagens permitem que os usuários criem programas por meio da manipulação de componentes gráficos ao invés do uso de linhas de código. Em outras palavras, usam uma representação analógica para os algoritmos.

Embora os ambientes de programação visual para modelagem paramétrica não sejam exatamente Linguagem de Programação, pode-se dizer que eles possuem algumas de suas características, como o uso da interface *"box-and-wire"* (caixas e fios), a possibilidade de inserir códigos em alguns componentes e a organização hierárquica dos componentes, que podem ser agrupados para formar subunidades.

De maneira semelhante, nas ferramentas de programação visual para modelagem paramétrica não é necessário declarar variáveis, mas simplesmente arrastar um parâmetro e atribuir valores a ele. Além disso, não é essencial planejar a ordem das ações, e não existem regras sintáticas. Mesmo quando um código em Script é utilizado, este fica restrito a um componente específico, portanto os possíveis erros são facilmente localizados.

O *plug-in Grasshopper* para *Rhinoceros* é um editor de algoritmos gráfico que permite aos designers sem experiência de *script* e programação formal gerar rapidamente formas paramétricas utilizando-se de programação visual baseada em diagramas. Essas geometrias e formas geradas são pré-visualizadas dentro da área de trabalho do *Rhino*, e qualquer alteração nos parâmetros de transformação gráfica do código resulta então em uma atualização visual imediata, obtendo assim um *feedback* instantâneo do efeito geométrico que a mudança de um parâmetro pode provocar.

Alexander (1971), baseado na teoria dos grafos e dos conjuntos, e Eisenman (1963), inspirado pela desconstrução de Deleuze e Derrida, usaram diagramas para representar projetos. De acordo com Somol (2007), na segunda metade do século XX o diagrama se tornou uma técnica e um procedimento fundamental no conhecimento de projeto, além de uma ferramenta para a produção e representação do discurso em arquitetura. Os modelos analógicos desenvolvidos sobre a interface do *Grasshopper* podem ser entendidos como diagramas de projeto, que exigem certo nível de abstração, porém não se distanciam tanto da realidade como os códigos de programação em texto.

É possível executar algo muito semelhante em certos ambientes para modelagem paramétrica com recursos de programação visual sem a necessidade de digitar sequer uma linha de código em texto. Ao invés de apresentar uma interface para escrever linhas em um compilador esses programas contêm uma área de trabalho em que podem ser introduzidos

componentes que irão compor o "código" que realizará a tarefa.

Cada ponto é representado, na tela do software, por um componente que os gera na área de trabalho do *Rhinoceros*. Esses componentes lembram visualmente pilhas, com conectores de entrada de dados à esquerda e de saída dos resultados à direita. Os componentes que geram os pontos são conectados a um terceiro componente, que gera uma linha. Os valores que não são especificados, como no caso da coordenada z dos pontos, recebem um valor *default* (neste caso, z=0). Quando o usuário modifica a posição nas barras de rolagem os pontos mudam de lugar, e consequentemente a linha também, sendo redesenhados na área de trabalho do *Rhinoceros* (Figura 2).

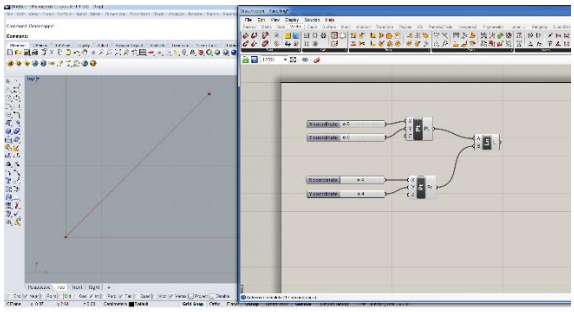


Figura 2 Demonstração de um desenho de uma linha com as interfaces do software Rhinoceros (a direita) e do plugin Grasshopper (a esquerda).

4.2 Tipos de Processos Computacionais

Desde a concepção do produto, estamos indo em direção ao Design do sistema (o processo) que projeta o produto. A evolução dos recursos de design, as necessidades dos desempenhos dos edifícios, a conexão atual com o inovador, "Impressão" e técnicas de fabricação estão empurrando o campo arquitetônico para redescobrir uma abordagem científica do fato arquitetônico. (FIAMMA, 2011).

Nos modelos computacionais os objetos são combinados para dar forma a um modelo completo de um edifício, contendo informação muito mais rica do que os modelos bidimensionais do computador usados para o estudo e a apresentação de projeto. Segundo COHEN, os modelos computacionais dividem-se conforme seu sistema de construção (COHEN, 2004):

A. **Modelos Geométricos: incluem formas, linhas e pontos, e componentes tridimensionais tais como** blocos, cones e esferas, mas não carregam a inteligência sobre outras propriedades destes objetos.

B. Modelos Paramétricos permitem o relacionamento entre elementos que podem ser identificados visualmente. Quando uma variável é mudada, seu efeito é visto nos elementos relacionados. Originalmente desenvolvido para as indústrias aeroespaciais e automotiva para projetar formas curvas complexas, a modelagem paramétrica trabalha como uma planilha eletrônica numérica. Armazenando as informações relativas aos relacionamentos entre os vários elementos do projeto e tratando estes como equações matemáticas, ela permite que qualquer elemento do modelo seja alterado e que se regenere automaticamente o modelo da mesma maneira que uma planilha eletrônica recalcula quaisquer mudanças numéricas. Por exemplo, as plantas, seções, elevações, revestimento e programações são gerados como vistas do modelo e atualizados automaticamente com cada mudança.

C. Modelos Processuais adicionam a habilidade para, por exemplo, impedir que os elementos compatíveis estejam colocados juntos a si, ou que as portas estejam com aberturas em um sentido não correto.

D. Modelos Generativos criam as geometrias que cumprem as exigências incorporadas pelo usuário, como: "gere a disposição otimizada de assentos para um determinado auditório" ou "crie uma escada entre dois pavimentos". Os modelos generativos seguem as regras definidas pelo projetista, tal como a "distância de separação das fileiras de assentos de um auditório".

Segundo Schumacher (2017), o "tectonismo" implica no aumento estilístico dos processos de busca e otimização de formulários baseados em engenharia e fabricação.

Essa abordagem exploratória está intimamente ligada com o objetivo deste trabalho, que busca estudar, compreender e investigar as possibilidades de criação que a programação oferece como ferramenta disponível ao designer.

Assim, o processo tradicional de projetação arquitetônica também vem sendo pressionado pelo aumento da complexidade dos atuais projetos de construção, que passaram a exigir um esforço muito maior para compatibilizar mais informações, avaliar possibilidades, evitar o retrabalho e minimizar erros e interferências. Portanto, diferentemente dos trabalhos de designers que utilizam a tecnologia como meio de otimizar e agilizar o processo construtivo, o design "um-pra-um" passa a integrar a tecnologia e a ferramenta desde o ato criativo.

É dessa forma então que se destaca o enfoque do assunto tratado ao longo deste trabalho: o fato de que a escolha do processo de produção do design tem implicações diretas em sua própria concepção.

5. PROTOTIPAGEM E FABRICAÇÃO DIGITAL

Arquitetos e projetistas, sempre construíram protótipos e maquetes para representação de suas ideias ou tradução do processo de projeto. Hoje, muitas dos desejos e previsões tecnológicas foram plenamente realizadas e as ferramentas para executá-las tornaram-se onipresentes na vida cotidiana de um arquiteto, desde o software de design computacional até a fabricação digital. Esses avanços tecnológicos já ofereceram possibilidades sem precedentes para os arquitetos e possibilitou novos processos de expressão, desempenho, material, fabricação e construção.

Apesar disso, segundo Henriques (2013), a indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), mesmo possuindo uma grande importância econômica e requerer muitos meios, é uma das que mais desperdiçam recursos e tempo, oferecendo pouca personalização e pode ser considerada como um dos setores mais obsoletos tecnologicamente no qual o processo de projeto e construção menos evoluiu, persistindo ainda uma separação entre as diferentes partes integrantes, resultando em processos segregados.

Talvez a área mais em evidência atualmente, e que tem o maior potencial de contribuição para o design, seja a fabricação digital. As tecnologias digitais de CAD e CAM mudaram radicalmente a abordagem conceitual, não apenas na arquitetura, mas também no design estrutural e material (GOLAŃSKI, 2018). As tecnologias avançadas de projeto auxiliado por computador (CAD) e de fabricação assistida por computador (CAM) têm impacto significativo no projeto e na fabricação de arquitetura (LEACH, 2004). Assim como os primeiros softwares paramétricos CAD/CAM os processos de Prototipagem Rápida (PR) e Fabricação Digital (FD) surgiram primeiramente em outras indústrias como a indústria aeroespacial, automotiva e de consumo (SEELY, 2004).

Somente a partir do fim dos anos 2000, que a fabricação digital tomou proporções bastante significativas, de modo a tornar-se uma das áreas de maior influência no design, enquanto na arquitetura iniciaram-se os primeiros estudos de viabilização de produção em escala real (1:1). Além disso, novas patentes de impressão 3D vieram a cair durante esse período, o que ocasionou o barateamento dos dispositivos e maior acessibilidade para pesquisas na área.

Conforme Henriques (2013), na arquitetura e engenharia, os computadores surgem como forma de reduzir tarefas repetitivas, ainda que só comecem a ser comuns quase no fim do século XX. Apesar disso, a separação entre concepção, fabricação e construção ainda persiste, problema associado a uma visão segregada de conhecimentos multidisciplinares que em geral são abordados de maneira isolada, do qual o potencial da computação para resolver novos problemas e procurar alternativas ainda é pouco explorado.

O conceito de fabricação digital se forma por um conjunto de tecnologias que são combinadas para a fabricação de objetos físicos a partir de dados e desenhos realizados por sistemas de projeto com auxílio do computador (CAD/CAM/CAE, Desenho, Manufatura e Engenharia assistidos por computador respectivamente). Esses métodos permitem a geração de formas que são elaboradas no computador, com geometrias e modelos cada vez mais complexas, compatibilizando-os com as várias técnicas de prototipagem e tipos de máquinas com usos bem diversificados em muitas escalas e extremamente precisos, como por exemplo, a verificação estrutural de uma peça, modelos com detalhes construtivos, peças para determinado projeto, moldes para carpintaria entre outros.

Uma das principais ocorrências da disseminação da fabricação digital foi à reaproximação entre design e produção. As diversas tecnologias de fabricação digital permitem ao designer reduzir as imperfeições e erros da interpretação de desenhos bidimensionais e perda de informações relacionados ao projeto para à sua execução, pois reduz etapas e fornecem mais dados e insumos para a realização correta da mesma, com maior detalhamento e produção direta de grande fidelidade ao modelo, além da própria possibilidade de se suprimir duas etapas essenciais dentro do processo de projeto tradicional: a produção de desenhos técnicos e sua interpretação por terceiros, que durante a ação de se interpretar as informações contidas nos desenhos técnicos, pode-se gerar imperfeições de execução por não fidelidade na execução das informações passadas.

As aplicações de computador podem ser direcionadas para programar uma ampla gama de máquinas que funcionam de maneiras muito distintas. Alguns usam um laser para cortar camadas finas de material que podem ser posteriormente montadas em modelos tridimensionais (cortador a laser). Outros usam brocas para remover ou escavar material de uma massa de material existente (CNC), e outros agregam material granular leve através de uma série de camadas sucessivas para produzir um objeto tridimensional essencialmente homogêneo (impressora 3-D).

Cada um desses processos de fabricação é aliado a estratégias conceituais que podem ser exploradas de maneira única através das restrições tecnológicas da máquina e do software correspondente.

Dentro deste contexto, a área da construção civil está incorporando essas tecnologias e seu uso vem sendo difundido na aplicação desde o estudo de modelos em escala reduzida até a construção de peças em escala real (BUSWELL, 2007).

O momento da difusão e do barateamento das técnicas de fabricação digital é definido por alguns autores, entre eles Kolarevic (2005), como o momento da "Quarta Revolução Industrial", com uma consequente mudança nos paradigmas industriais, na produção seriada em larga escala (característicos da Segunda Revolução Industrial), e na *"mass customization"* (KOLAREVIC, 2001), ou seja, a produção em larga escala de objetos únicos e diferentes entre si.

Na arquitetura, a relevância acerca do uso das tecnologias digitais no processo de projeto e na produção se dá pela possibilidade de gerar diferentes soluções personalizadas utilizando a produção em série, prática que originou o conceito denominado *mass customization* (customização em massa) e um novo paradigma Pós-Fordista para a economia do século XXI. Dessa forma, torna-se possível pensar métodos que permitem a personalização em massa de bens consumíveis, constituindo componentes individuais personalizados em resposta a diferentes condições locais para criar soluções adequadas dentro das variantes necessárias para cada projeto (KOLAREVIC, 2005).

Os termos Indústria 4.0 ou Quarta Revolução Industrial englobam algumas tecnologias para automação e troca de dados e utiliza conceitos de Cibernética e Robótica, Internet das Coisas, Fabricação digital e customização em massa e Computação em Nuvem.

Além da velocidade e da amplitude, a revolução em curso é única também pela crescente integração entre diversas áreas de conhecimento e pesquisa. Esse é um campo em que os avanços são impressionantes, graças ao aumento exponencial da capacidade dos computadores e à oferta de uma vasta quantidade de dados. Entre os princípios que podem ser caracterizados como diretrizes da Quarta revolução industrial encontram-se: interoperabilidade, virtualização/simulação, descentralização, análise em tempo real, orientação a serviços e modularidade (SCHWAB, 2015).

A customização em massa possibilitou principalmente a adequação de objetos produzidos industrialmente para que atenda às necessidades de cada consumidor, sendo que permite até mesmo, ser realizada pelo usuário, e não necessariamente seguindo uma lógica e instrumentação fabril, esse próprio usuário que passa a projetar e produzir todas as etapas dos produtos que sejam os definidos às suas necessidades.

Este estabelecimento de uma conexão direta entre objeto concebido digitalmente e sua construção, é potencializado através do processo *file-to-factory* (KOLAREVIC 2005), com as tecnologias de fabricação digital que permitem que os componentes do objeto possam ser produzidos em dimensões diferentes sem que isso signifique diminuição na eficiência produtiva e elevação de custo.

O paradigma da variação paramétrica reforça esses conceitos e dialoga de maneira eficiente com essas ferramentas de fabricação e personalização em série. Soluções de projeto parametrizadas resultam na geração de componentes diferenciados, pois o sistema de projeto permite a geração de infinitas formas, que são ao mesmo tempo relacionadas e distintas entre si.

6. CASO PRÁTICO: O PAVILHÃO WAFFLE

Neste item é apresentado um trabalho desenvolvido como meio de vivenciar, aprofundar e comprovar as teorias e conceitos abordados até aqui. O desenvolvimento do caso prático consiste no ato de se projetar, simular, fabricar e avaliar um pavilhão em material MDF *(médium density fiberboard)* seguindo a lógica construtiva desenvolvida nos *softwares* que foram utilizados. Levando-se em consideração a natureza deste trabalho, o experimento apresentado não serve como meio de comprovação, mas sim de exploração das suas potencialidades, de relato do processo e de suas principais vantagens e dificuldades. Os testes formais foram realizados

dentro da interface *Rhino / Grasshopper*, com o propósito de estética e geometrização da forma.

Como relatado nas seções anteriores, as ferramentas disponíveis, o material e o processo influenciam todo o projeto e traduzem nas tectônicas que demonstram como determinado processo define o partido da tectônica da arquitetura resultante.

Dessa maneira, esta seção tem como principal objetivo a descrição da metodologia realizada para a obtenção um modelo de estudo que ilustra os conceitos e as relações sobre tectônicas e design computacional até aqui descritas. Sendo assim é proposta a construção de um protótipo realizado dentro de um sistema digital baseado em algoritmos paramétricos para a construção de um objeto final intitulado de Pavilhão *Waffle.* Essa proposta visa a embasar a ideia de tectônica digital contemporânea, que é resultante de uma série de estudos e variações, pertinente a diversos âmbitos de pesquisa, tais como: processo de montagem, simulação e performance estrutural, geometrias mais complexas entre outros, dos quais, seriam provavelmente muito difíceis de serem realizadas utilizando-se de métodos tradicionais ou softwares de ordenação não algorítmico-paramétrico.

6.1 Seleção de Critérios

Nesta seção pretende-se demonstrar quais foram os fatores de decisão para a escolha dos parâmetros utilizados na escolha do modelo a ser prototipado e construído.

Um critério de seleção avalia várias formações algorítmicas de acordo com a viabilidade e adequação do projeto de acordo com as intenções e objetivos do mesmo. É importante, como parte do processo de design, convergir claramente para os modelos que tendem a ser mais bem-sucedidos e que poderiam ser posteriormente desenvolvidos. Este critério serve para manter um equilíbrio entre a ambição de conceitos da forma do projeto com as limitações de design realistas.

Segundo Erioli (2016) a expressão tectônica toca uma parte muito importante do processo de design que tem a ver com autoria, intencionalidade e a possibilidade, no caso particular do design generativo, de conduzir o sistema de auto-organização para explorar melhor e aproveitar seu potencial não revelado. De acordo com Roland Snooks (2012) a autoria em design generativo pode ser traçada no padrão de dois tipos contrastantes de decisões: critérios (que enquadram o reino possível do produto e são inerentemente estáveis) e procedimento (que considera a condição de operação, portanto é inerentemente especulativo e processual); simulações permitem a possibilidade de resultados emergentes através da interação de procedimentos de design.

O processo de design compreende desde os croquis iniciais, primeiros testes algorítmicos dentro do *Rhino e Grasshopper* até simulações físicas e construtivas. Para o processo de design foi considerada como parâmetros iniciais de projeto a dimensão que o objeto ocuparia, bem como o local a ser disposto.

O partido inicial do projeto teve como concepção a ideia de um pavilhão/abrigo que se estrutura através de uma malha orgânica. A finalidade do modelo seria o de atestar e permear os vários processos necessários para a consolidação de um projeto que passa do meio digital ao físico.

A instalação do modelo foi realizada no interior do saguão do galpão da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Juiz de Fora. Tendo como parâmetros iniciais dimensões de 3 x 3 x 2,5 (largura, comprimento, altura).

O ponto inicial para o começo da elaboração do partido tectônico se deu através de várias restrições reais e através dos processos digitais, conforme explicitado na Figura 3, das quais podemos destacar: o tipo de material a ser utilizado, que de implica em uma ramificação para outros condicionantes como o peso total da estrutura, facilidade de montagem e manejo e possibilidade de corte devido a relação entre densidade e espessura e a capacidade da máquina CNC. Um outro fator levado em conta, ainda que em menor expressão, foi o estético, que teve como princípio a geração de uma forma orgânica, potencializada pelo uso dos softwares algorítmico paramétricos e a possibilidade de noção espacial que fornecesse uma sensação de entrada em um ambiente delimitado por sua geometria, assemelhando-se a um ambiente de "abrigo".

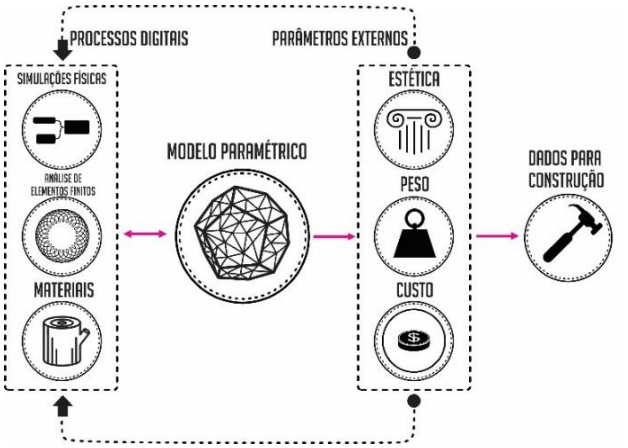


Figura 3 Diagrama de critérios de seleção considerados no projeto.

6.2 Iterações Digitais

Como visto a seleção das várias iterações partiu do princípio de alguns fatores-chave como: viabilidade, estética, facilidade de montagem e principalmente o custo total. Em primeira instância, observou-se que o projeto se encaixasse no contexto do lugar, devendo assim não possuir dimensões muito extensas, evitando encarecimento da produção e maior complexidade e tempo de montagem, sendo um parâmetro de partido do projeto a presença de conexões simples e peças para a fabricação de fácil operação. As considerações entre a interação e a estética do design foi também levada em consideração. Ainda que este fator esteja ligado a diversos pontos de vista, o ponto de partida foi a criação de superfícies bases com formas mais orgânicas, que explorassem o potencial das tecnologias de parametrização evidenciando seu uso e processo.

Como resultado destes estudos preliminares pretende-se desenvolver o projeto do pavilhão através de uma série de técnicas que permeasse entre o aspecto virtual e físico. Esta seção visa a detalhar o processo de modelagem do objeto a ser projetado, permeando por todos os conceitos (geométricos, computacionais, materiais e organizacionais) que o compreendem.

Os métodos paramétricos de registro da geometria são caracterizados por uma relação diferente entre o designer e o modelo, se comparada à modelagem direta (por exemplo, manipulação manual dos pontos de controle NURBS da curva). Um modelo paramétrico não contém uma descrição de uma forma rígida, mas a definição de relações espaciais, os princípios de herança de características geométricas específicas por elementos de estrutura secundária, o método de alocação e o método de geração de níveis sucessivos de relações espaciais. Uma forma pré-gerada pode ser modificada, alterando o valor de determinados parâmetros, até que satisfaça certos critérios como por exemplo estéticos ou estruturais.

6.3 Primitivas da Forma – Superfície

A geometrização e modelagem da forma e de suas primitivas (Figura 4) inicia-se com uma definição inicial de um perímetro que delimita a altura, comprimento e largura máximas que a superfície primitiva possui. Este conceito em geometria e modelagem é conhecido como *"Bouding Box"* (caixa delimitadora), e que pode ser entendida como uma caixa que englobe todo o conjunto de pontos nas dimensões determinadas, com a menor medida (área, volume, ou hipervolume em dimensões superiores) possível que agrupe todos estes pontos.

Com os limites definidos, foram desenhadas curvas com pontos de controle que estivessem dentro das delimitações desta caixa de dimensões máximas permitidas para a forma, onde através destes pontos de controle, as curvas foram ajustadas através dos pontos de controle para suavizar as suas curvaturas e evitar qualquer ponto que possuísse ângulo muito agudos. As operações seguintes foram o comando *"Loft"*, comumente utilizado para a criação de superfícies através de um perfil de curvas selecionadas que definem a sua forma. Com a superfície gerada, pontos de controle novamente foram usados para provocar deformações e na obtenção de uma geometria que provocasse uma melhor exploração dos potenciais de formas mais líquidas como ferramentas computacionais baseadas em modelos matemáticos NURBS (*non uniform rational basis spline*).

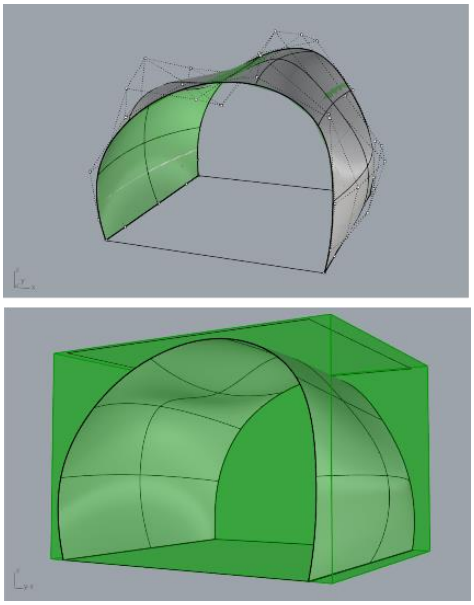


Figura 4 Pontos de controle e caixa delimitadora de superfície.

Após a realização da superfície primitiva, precisou-se realizar ainda algumas outras operações de modelagem como a necessidade de se estabelecer uma espessura máxima para essa superfície, que seria correspondente a largura das chapas na fabricação do projeto em sua fase final. Assim iniciou-se o processo de codificação do projeto através de uma lógica de seccionamento e planificação da forma fazendo uso do *Plugin Grasshopper* para *Rhinoceros*.

6.4 Codificação e Lógica construtiva

Foram utilizados na definição (nome geralmente dado ao código final realizado em plataformas de projeto por linguagem de programação) final da forma realizada no *Grasshopper* alguns plugins adicionais. Destacam-se os add-ons *bowerbird* e *pufferfish* ambos disponíveis gratuitamente na plataforma www.Food4Rhino.com que disponibiliza diversos tipos de plugins e componentes para *Rhino* e *Grasshopper* para download. O *Bowerbird* contém uma série de Clusters e ferramentas de modelagem direcionadas ao seccionamento e a fatiamento de superfícies de malhas, oferecendo a possibilidade de se trabalhar com *Waffles* lineares simples e *Waffles* radiais (que se orientam em torno de ponto inserido em um raio circunscrito de determinada curva) conforme ilustrado na Figura 5. Ele além dos inputs de parâmetros básicos como espessura, número de lâminas do modelo e profundidade dos entalhes, ainda gera uma operação booleana (operação que dentro da ciência da computação identifica se um dado primitivo que possui dois valores, que podem ser 0 ou 1 ou se é falso ou verdadeiro), de planificação automática das chapas geradas.

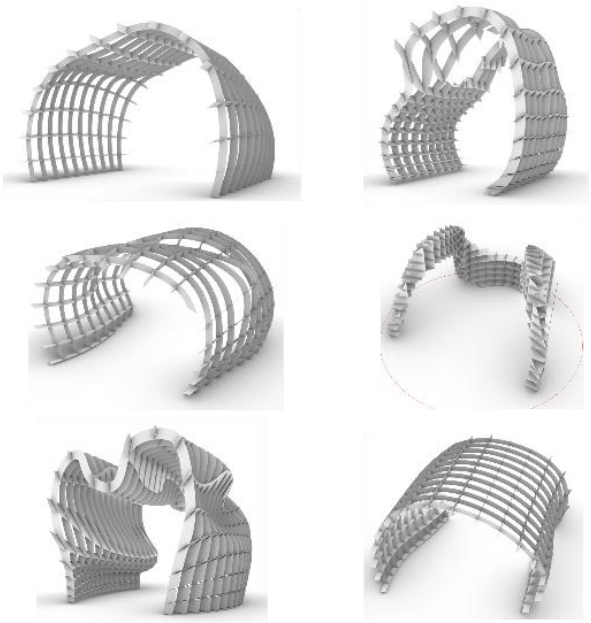


Figura 5 Iterações das possibilidades formais do modelo.

Por fim, ainda é possível usar um outro componente presente do Bowebird que permite a identificação das chapas planificadas e a orientação das mesmas. Outro importante *plugin* presente na definição usada para obtenção da forma foi o *Pufferfish*, que possui umas série de componentes voltados essencialmente na modificação da forma. Sua utilização permitiu a combinação e compatibilização da superfície gerada a ser introduzida no componente de geração dos waffles, sendo determinantes para a largura das chapas baseadas em uma extrusão da superfície base.

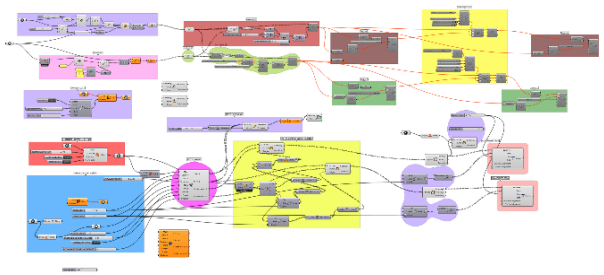


Figura 6 Código final usado na geração do modelo.

É importante destacar na pesquisa, a simplificação do código (Figura 6), gerando menos operações, desde que não abrisse mão do conceito inicial. Outro fator de relevância foi a possível utilização da definição obtida para a geração de *Waffles* lineares ou radiais com uma grande possibilidade de superfícies geradas seja por extrusão de curvas ou por operações de *loft* (Fig.7).

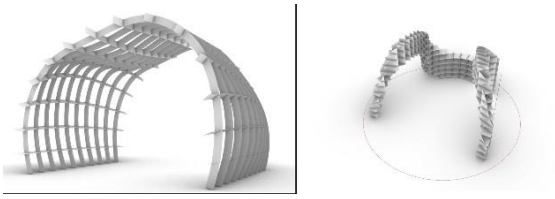


Figura 7 Orientação Linear e Radial respectivamente.

Podemos ver em detalhe na Figura 8 quais foram os parâmetros e informações foram considerados para a obtenção da lógica de projeto do Pavilhão Waffle. Parâmetros como espessura do MDF, Número de Chapas em X, Número de Chapas em Y, Profundidade dos Entalhes, forneciam os inputs necessários que eram visualizados dentro da interface do Rhinoceros, buscando atingir uma forma que fosse viável de construção mesmo quando observada dentro de um ambiente digital.

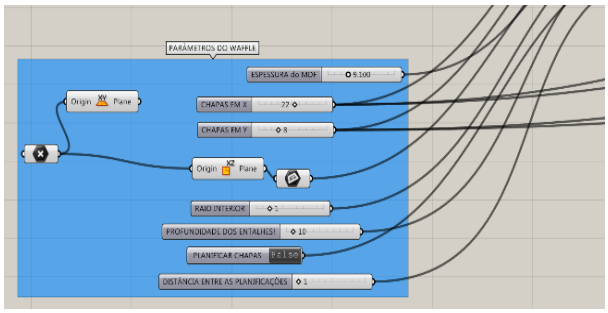


Figura 8 Detalhe dos Parâmetros controladores da forma do Pavilhão Waffle.

A parte final do código foi direcionada a realização de refinamento destes parâmetros iniciais, como planificação, ordenamento e identificação da planificação, remoção da intersecção entre as geometrias, pontos de atração da malha e em evitar qualquer conflito entre os desenhos gerados no modelo (Figura 9).

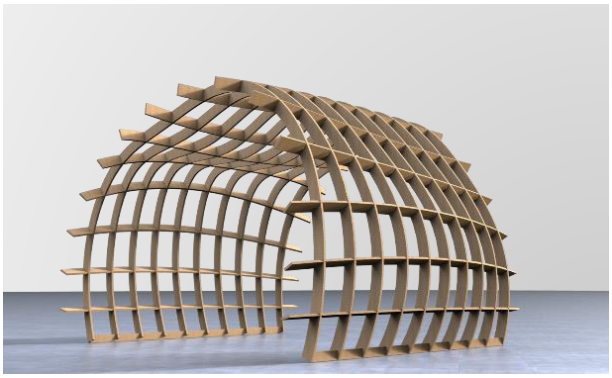


Figura 9 Imagem do render da forma escolhida para montagem.

6.5 Viabilidade, Simulações e Análises

Embora o design digital permita métodos de busca generativa e forma ilimitada, a tradução entre o design no meio virtual para a fabricação física é imensamente ampla, pois o software digital tem tolerâncias e negligencia as forças do mundo real. Portanto, durante a conversão digital para modelo físico pode afetar e modificar significativamente a forma, a função e a construtibilidade, que podem alinhar-se ou neutralizar as intenções do projeto.

A importância de realizar simulações vai de encontro a concepção do projeto desde suas etapas iniciais, para fornecer informações de performance e possibilidade construtiva do design pretendido, identificando e evitando qualquer incompatibilidade no design.

Os testes estruturais averiguaram a possibilidade construtiva e averiguação dos pontos de tensão da forma e dos encaixes. O método utilizado de simulação estrutural será o de estudo dos elementos finitos, que foi originalmente desenvolvido na década de 40 pelo matemático Richard L. Courant, que realizou pesquisas nas áreas de análises reais, matemáticas e de equações diferenciais parciais, com um software auxiliar dentro da interface do software de modelagem paramétrica utilizada no projeto.

Para tal, neste momento do projeto, pretendeu-se a avaliação da estrutura do abrigo através de simulações virtuais com utilização do *plug-in Scan-and-Solve* na geração de gráficos sobre o modelo CAD 3D com análises de elementos finitos, que demonstrasse assim as áreas de maior esforço, deflexão e as relações entre o tipo de material e os vãos e apoios das peças.

Após a instalação do Plugin Scan-and-Solve, o mesmo pode ser executado através da interface do Rhino digitando na barra de comandos a palavra “SnS” ou clicando no ícone disponível na barra de menu. Sua interface é bem simples e consiste em 4 abas: especificações, visualização, configurações e informações sobre o plug-in (Figura 10). O Scan-and-Solve não exige um alto grau de conhecimento de análise estrutural do usuário, ele tem como objetivo a geração de um modelo simplificado de elementos finitos.

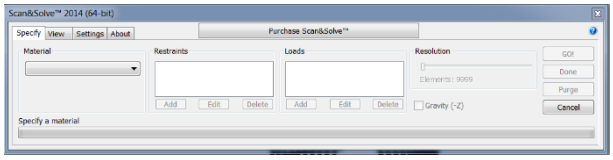


Figura 10 Janela do Plugin Scan-and-Solve para Rhinoceros.

O método dos elementos finitos também chamado de análise de elementos finitos é um método numérico para a resolução de problemas de engenharia e física matemática. As principais áreas em que a aplicação do método de análises finitos incluem a: transferência de calor, elasticidade, vibração, hidrodinâmica e análise estrutural. A formulação do método de elementos finitos do problema resulta em um sistema de equações algébricas. O método produz valores aproximados dos desconhecidos em um número discreto de pontos sobre o domínio.

Para resolver o problema, ele subdivide um grande problema em partes menores e mais simples, chamadas de elementos finitos. As equações simples que modelam esses elementos finitos são então reunidas em um sistema maior de equações que modela todo o problema. Uma das maiores vantagens dessa técnica é a flexibilidade na manipulação de parâmetros e na realização de ajustes.

Os elementos finitos são conectados entre si por pontos, os quais são denominados de nós ou pontos nodais. Ao conjunto de todos esses itens – elementos e nós – dá-se o nome de malha (Figura 11). A precisão do Método dos Elementos Finitos depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número deles em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise.

O conceito básico do método se fundamenta na subdivisão da totalidade de um domínio em partes menores e simplificadas com a intenção de obter as seguintes vantagens para realizar o cálculo:

- Representação precisa de geometrias complexas
- Inclusão da propriedade de materiais

- Facilidade de representação da totalidade da solução obtida
- Captura de efeitos locais.

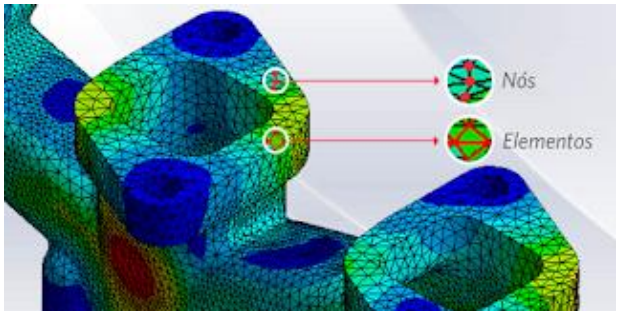


Figura 11 Relação entre nós e elementos de uma malha em elementos finitos. Disponível em: https://goo.gl/m2SM8P

É importante lembrar que todas as chapas e componentes do modelo precisam passar por um comando de união booleana, como se estivessem conectadas, já que o plugin Scan-and-Solve só permite a análise de um elemento por vez e definidos como malha ou sólidos, portanto não permite a especificação de conexões articuladas entre partes.

A simulação considerou a espessura final da chapa de MDF com o valor de 15mm de espessura. O primeiro passo para a análise do modelo inicia-se com a indicação de áreas de reação e as áreas de cargas no modelo. No caso do projeto desta pesquisa, a superfície base das lâminas no eixo Y do modelo foi configurado como as áreas de reação e o restante das superfícies, caracterizadas como todas as outras placas que resultam no peso próprio da estrutura, foram definidas como as cargas totais (Fig. 12) e por fim é preciso especificar as propriedades do material MDF do objeto como densidade, módulo elástico, etc.

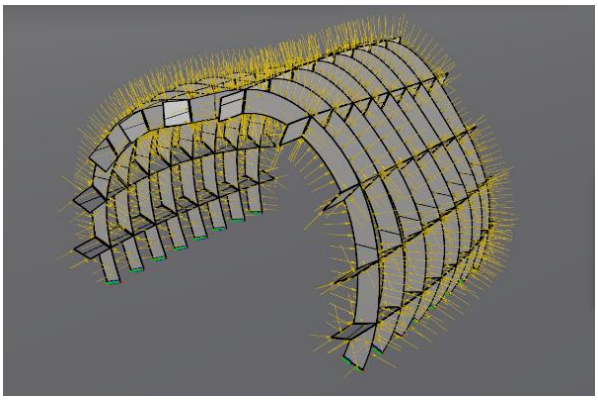


Figura 12 Visualização dos vetores de carga presentes na estrutura.

Uma nova janela é então aberta (Figura 13), onde são necessários o preenchimento de alguns parâmetros a serem definidos com base no material utilizado como: Critério de Falha, Relação de Densidade por kg/m^3, Módulo Elástico, Relação de Poisson, Limite de Elasticidade, Força de tensão e Compressividade.

Após a simulação um resultado da análise estrutural executada no Scan-and-Solve é gerado, permitindo um comando *"Bake"* (efetua a geometria resultante na área de trabalho do *software*) do próprio Plugin para a visualização na interface do Rhino com os resultados e as deformações resultantes.

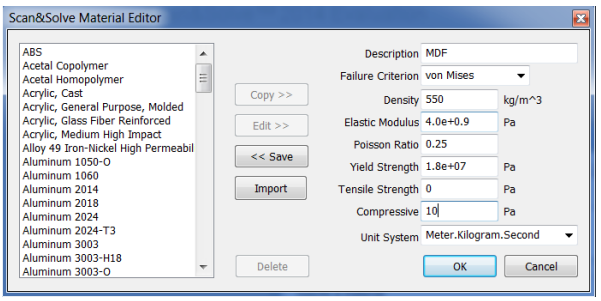


Figura 13 Janela do Scan-and-Solve com as especificações do material

Agora nesta etapa o software lida com a análise de elementos dos elementos finitos, ou seja, o software irá se basear através da malha que desenvolvemos, quanto mais exata, maior será a precisão das análises geradas pelo software.

O gráfico gerado demonstra quais as áreas de deflexão total em escala de milímetros, com as áreas demarcadas em vermelho e tons quentes as de maior deflexão como demonstrado na Figura 14.

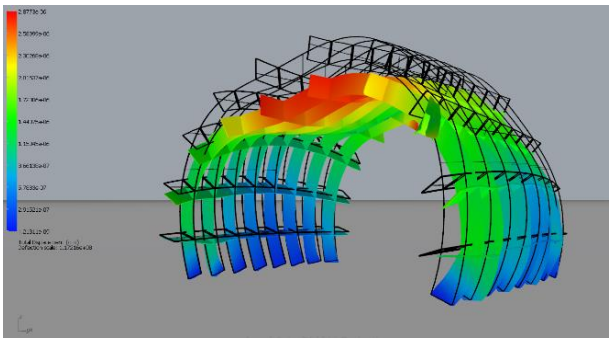


Figura 14 Gráfico de deslocamento total máximo

O Critério de Von Mises é um modelo matemático que se baseia em geometria e física, com origem em análise de tensões (mecânica dos sólidos). Fundamentalmente quando iniciamos uma análise de comportamento de um material, questiona-se qual a capacidade deste material quando submetido à alguma força ou trabalho. Através dos carregamentos são definidas forças, pressões, acelerações, momentos, cargas térmicas e deslocamentos prescritos. Através das restrições são definidas condições de contorno do modelo como apoios ou engastes. Os tipos de análises mais conhecidas são: estática (linear, não-linear), dinâmica (modal, resposta em frequência, PSD, transiente), otimização topológica, termo estrutural e fadiga (Figura 15).

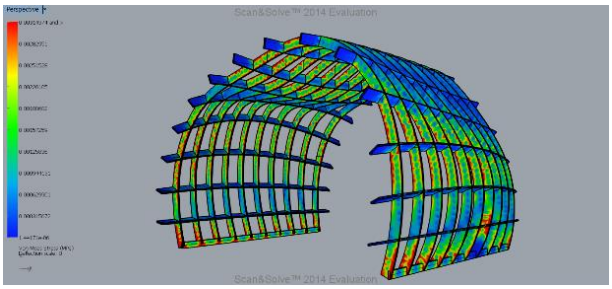


Figura 15 Nível de Stress, Método de Von-Mises.

Apesar das limitações do software, pode-se afirmar que o *Scan-and-Solve* é uma boa opção para a simulação de comportamento do mundo real de formas modeladas digitalmente, especialmente no caso de estruturas monolíticas e rígidas. Para a análise de estruturas com encaixes flexíveis, ela ainda permite o uso de resultados preliminares. De qualquer

modo, o uso de simuladores nas etapas iniciais do processo de projeto pode levar a percepção e soluções melhores de design em relação ao desempenho estrutural, mesmo por usuários com conhecimento limitado de mecânica dos materiais e dimensionamento estrutural.

6.6 Planejamento, Fabricação e Execução

Os planos de produção são necessários para elaborar os diferentes componentes na fabricação digital e sua natureza depende da máquina específica utilizada (embora existam vários formatos gerais). Em outras palavras, eles são criados como parte do processo de produção e devem estar presentes desde o início a noção de qual equipamento vai ser utilizado.

Depois de averiguada a possibilidade estrutural, e escolhida a forma e montagem das peças, fazer o processo de planificação e racionalização da superfície. O processo visa a planificação das malhas do modelo para a prototipagem das peças na cortadora a laser e a realização dos testes das maquetes em diversas escalas.

As maquetes serviram como peça fundamental para validação e construção final do modelo, permitindo ajustes e testes. O objetivo foi a realização de duas maquetes nas escalas 1:10 para verificação do processo de montagem e outra maquete na escala 1:1 para verificar as folgas relativas do encaixe e montagem das peças, antes de iniciar os trabalhos finais na escala 1:1.

Algumas considerações sobre o maquinário utilizado na experimentação. A máquina de corte a laser utilizada (Figura 16) possui uma área de corte de 2500 x 1500 mm, é indicada para os materiais: Acrílico, metais, madeiras, MDF, PS, ABS, tecidos, couro e papéis de diversos tipos e gramaturas. Possui uma potência de laser de vidro de 1 cabeçote ou 2 cabeçotes de 100, 130, 150W ou 1 cabeçote de 260W, com expectativa média de vida de 2 a 3 mil horas, realizando cortes em MDF com espessura até 9 mm, segundo informações do fabricante. Disponível em: https://goo.gl/cQzD1R.



Figura 16 Máquina de corte a laser utilizada no experimento

Segundo Henriques (2013) dois tipos de documentos gráficos são utilizados para complementar desenhos de construção geral na fabricação física do projeto com equipamentos digitais. Estes são os desenhos de produção e as instruções de montagem gráfica. Ambos são comuns em outros setores de manufatura, mas normalmente não são normalmente usados em projetos convencionais de arquitetura.

A tarefa da montagem do modelo físico foi destinada a fortalecer a compreensão das técnicas utilizadas no projeto, tais como: superfícies e malhas, otimização topológica, estruturas paramétricas de nós e entalhes e preparação para fabricação digital. O processo de produção das maquetes, possibilitou que desde os primeiros momentos da preparação dos arquivos em CAD, até as etapas de corte e montagem, resultassem em insumos para possíveis e futuros ajustes dados a capacidade da máquina e das propriedades do material.

É importante apenas que a representação que é criada contenha uma descrição adequada para o processo de fabricação, excluindo todas as informações irrelevantes como textos auxiliares e cotas caso existam. Isso significa eliminar todos os elementos gráficos que não se tornarão fisicamente realizados deixando apenas perfis de seção e áreas a serem removidas. O tamanho depende das proporções e dimensões do material a ser usado, a "superfície de trabalho" da máquina no material e a certificação da escala correta.

O componente ou modelo deve ser adequadamente distribuído sobre esta superfície de trabalho, a fim de orientar o processo de fabricação e fazer o melhor uso do material, reduzindo o tempo de trabalho. Atualmente há programas específicos como *RhinoNest* que são capazes de analisar o layout de formas planas ou formas volumétricas para minimizar o desperdício de material. A planificação do projeto é gerada no *Grasshopper* e depois confirma-se a geometria no *Rhino* e salva-se no formato de arquivo ".dxf" com camada 0, sem cotas ou informações adicionais de texto além da numeração simples das peças para identificação, conforme ilustrado nas Figuras 17 e 18.

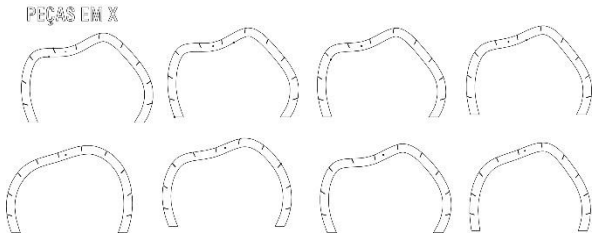


Figura 17 Planificação das peças no Eixo X

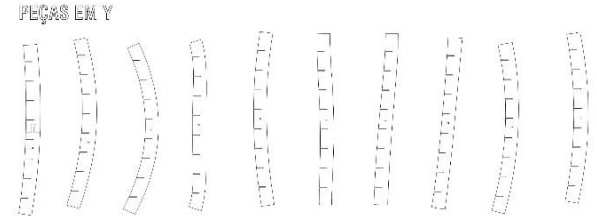


Figura 18 Planificação das peças no Eixo Y



Figura 19 Maquete do Pavilhão Waffle – Opção 1

Depois de geradas os desenhos com as planificações do modelo, fez-se a montagem de uma maquete em escala 1:10 de papel Paraná, com o objetivo de verificar qualquer tipo de possível não conformidade com o projeto digital, assim como a análise física do projeto, permitindo também a comunicação com outros agentes sobre a realização do projeto em escala 1:1. A primeira maquete (Figura 19), demonstrou que a estrutura possuía uma característica auto portante devido aos seus intertravamentos, reforçando a ideia do tipo construtivo por seccionamento do qual várias partes podem constituir um modelo único.

Outro ponto observado foi o número grande de peças neste primeiro projeto, com um total de 24 (sendo 10 no eixo X, e 14 no eixo Y), o tornando mais oneroso em tempo e custo. Observou-se também a necessidade de se ampliar a profundidade dos entalhes, para que as lâminas pudessem se encaixar melhor com as outras, assim como a largura das peças, com o intuito de gerar maior estabilidade nos apoios.

Com essas questões levantadas, optou-se por uma reformulação do projeto, mantendo-se a superfície geradora básica, mas diminuindo o número total de peças nos 2 sentidos, passando de 24 para 18 peças. Uma nova maquete foi então montada com o mesmo material mas com as alterações levantadas (aumento da largura das peças e aumento da profundidade dos entalhes), conforme demonstrado na Figura 20.



Figura 20 Maquete do Pavilhão Waffle – Opção 2

O processo de fabricação em si exige um esforço de planejamento ainda que relativamente pequeno, dependendo da complexidade da forma e da quantidade de componentes. Várias questões podem surgir durante o processo de fabricação devido às tolerâncias extremamente baixas permitidas pelas peças que devem ser perfeitamente ajustadas. O período de produção e fabricação de modelos pode ser dividido em dois momentos: a etapa exploratória, que investigou as propriedades materiais e de aprendizado da operação das máquinas CNC e a fase de produção, que define-se como a aplicação dos conhecimentos obtidos na etapa anterior para o processo final de produção do modelo.

Por fim, fez-se um estudo de corte com 2 tipos de materiais prováveis para a execução do Pavilhão *Waffle* em escala 1:1. Os materiais escolhidos foram madeirite (15mm de espessura) e MDF (9mm de espessura), para análise de qual densidade a máquina de Corte CNC disponível permitia. O material madeirite foi logo descartado já que a máquina não venceu a espessura de sua densidade. Dessa forma optou-se pelo MDF cru com a intensidade do Laser da máquina configurada no valor de “40” e a velocidade do corte em “5”.

Esse processo de experimentação do uso da máquina de corte e dos materiais utilizados, levantaram algumas questões como montagem das peças, tempo e precisão dos cortes. Durante esse momento de fabricação, diversos ajustes foram necessários devidos às observações encontradas, para o cumprimento com as propriedades do material.

6.7 Planejamento na Escala 1:1

Posterior à montagem das maquetes e a escolha do material, levantou-se uma importante questão pertinente à montagem das peças do Pavilhão *Waffle*. A totalidade da estrutura se compões de 18 peças em lâminas de encaixe, a geração destes 18 desenhos bidimensionais são ordenados em plantas para aproveitamento máximo da área de corte da máquina, distribuindo os padrões dos desenhos com a menor distância admissível para aproveitamento do material. O único, porém, é que a área de corte máxima permitida pela máquina CNC não era o suficiente para vencer o comprimento total das peças da estrutura em 1 único corte (Figura 21).

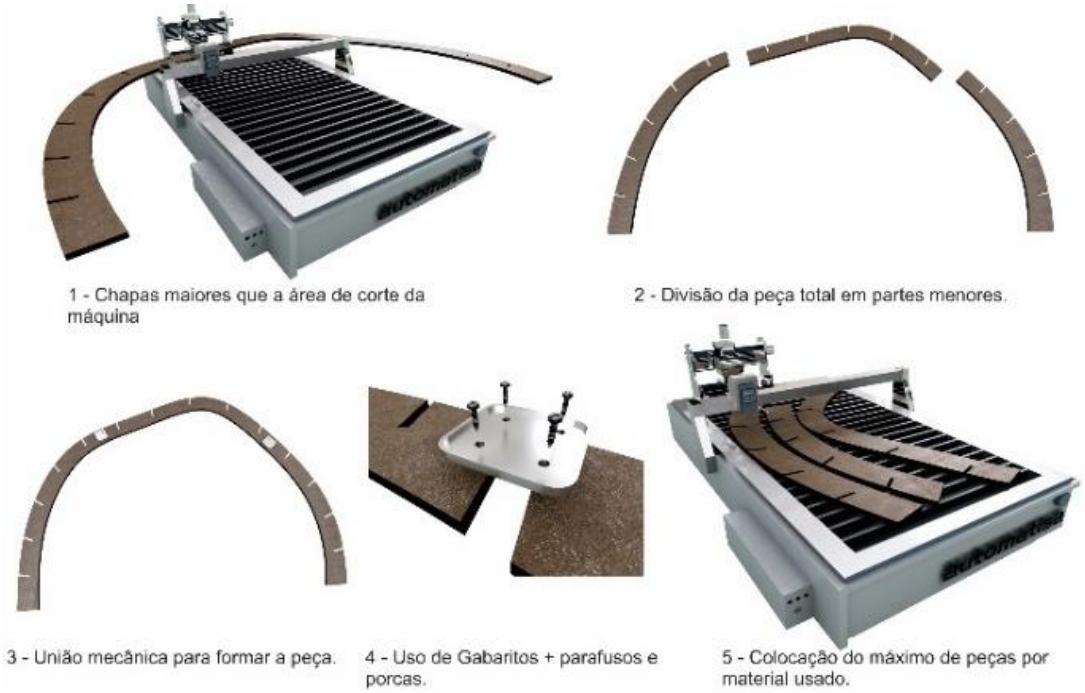


Figura 21 Esquema representativo da relação entre a área de corte da máquina a laser e o tamanho total das peças.

Sendo assim, tornou-se necessário um novo esquema de corte, com um tipo de desenho de seção na peça que proporcionasse a maior segurança e facilidade de montagem possível.

Depois de alguns estudos sobre tipos de encaixes em madeira, optou-se por um desenho em formato de Viga Gerber (Figura 22) como junção de encaixe das peças. O aparecimento das vigas Gerber ocorreu para resolver problemas de ordem estrutural e construtiva. As vigas Gerber têm lugar de importância na engenharia estrutural, e a tendência é de cada vez mais serem utilizadas, tendo em vista o desenvolvimento das técnicas de pré-fabricação e montagem de estruturas.

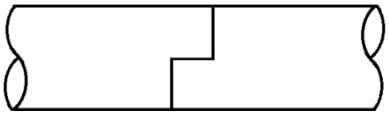


Figura 22 Representação esquemática de um encaixe de viga Gerber. Disponível em: https://goo.gl/uVBaHy. Acesso em: 07/08/2018.

A viga Gerber consiste na associação de vigas com estabilidade própria com outras sem estabilidade própria. Nesta associação, as vigas com estabilidade própria suprem as demais dos vínculos que lhes faltam, ficando o conjunto estável. A ligação entre as partes se dá por meio de articulações (fixas ou móveis), seu detalhe de desenho assemelha-se a letra "L", onde procurou-se no plano de projeto de cada peça em manter o sentido do desenho sempre com a extremidade voltada para cima em ambos os lados.

Cada peça em Y foi dividida em 2 partes menores, contando com um encaixe de Gerber, sendo então necessário 2 gabaritos que foram cortados na máquina de corte em material MDF, fazendo em um formato de sanduíche junto com a peça base e mais 4 parafusos e porcas necessários para a fixação da peça, já que a máquina de corte possui uma área menor do que a utilizada para a construção do pavilhão na escala desejada. Cada peça em X foi dividida em 3 partes menores, contando então com 2 encaixes de Gerber, sendo necessários 4 gabaritos junto com 8 parafusos e 8 porcas para cada peça em X (Figura 23).

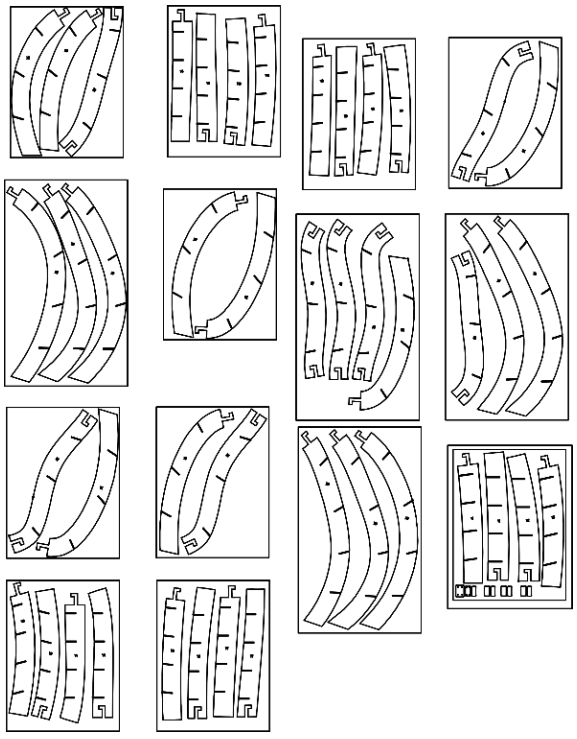


Figura 23 Todos os planos de cortes com os encaixes do tipo Gerber.

Outro elemento projetado com o objetivo de aumentar a sustentação da base da estrutura foi a de inserção de "sapatas" nas extremidades das peças em X (Figura 24).
Foram necessárias 15 chapas de MDF com dimensões de 1,50m e 2,20m, com um tempo total de corte das peças, gabaritos e sapatas de aproximadamente 35 horas divididas em 8 dias de trabalho.

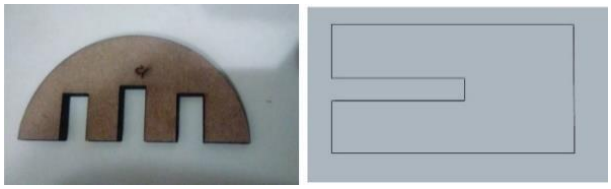


Figura 24 Teste da largura dos entalhes e precisão dos cortes e vista de topo das sapatas a serem colocadas na base da estrutura.

6.8 Primeira Etapa da Montagem Final

A construção do pavilhão na escala em 1:1 foi realizada através de um workshop intitulado Agenda DOMVS 06: Fabricação Digital e montagem do Pavilhão *Waffle,* na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Juiz de Fora no dia 8 de agosto de 2018. O workshop teve como objetivo a produção final do modelo, já que seria necessário um número mínimo de 10 pessoas para a sua montagem. O workshop contou ao todo com 19 participantes, sendo estes de maioria do curso de arquitetura e urbanismo e 2 participantes do curso de engenharia civil.

Em um primeiro momento, foram apresentadas aos participantes as bases da pesquisa, o conceito de tectônica e a evolução da mesma com o advento de recursos computacionais e da fabricação digital. Logo em seguida, foi abordada a lógica construtiva do modelo bem como o plano de projeto e as etapas necessárias para a montagem das peças e sua colocação dentro do plano de projeto proposto.

Depois de explicitada a ideia e as etapas seguintes, os participantes foram dirigidos até a sala do laboratório de prototipagem onde as peças se encontravam, em uma divisão formada entre 3 a 2 participantes cada, onde cada um ficou responsável pela colocação dos parafusos junto aos gabaritos de encaixe nos encontros das peças em formato de viga Gerber (Figura 25).



Figura 25 Detalhe do gabarito e parafusos das peças e demonstração da forma de encaixe no workshop.

A dimensão do parafuso é conhecida popularmente por "M8", tendo aproximadamente 8mm de diâmetro, com um cabeçote plano e de forma hexagonal. O comprimento do parafuso é de aproximadamente '32' milímetros para vencer a peça base mais os dois gabaritos, permitindo ainda a colocação de uma porca para fixação.

As peças precisaram ser limpas devido à fuligem causada pela queima do MDF com o laser da Máquina de Corte. Para a limpeza usou-se água e sacos alvejados. As peças foram então transportadas do laboratório para o saguão do galpão da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo pelos próprios participantes.

Foi importante lembrar aos participantes do workshop que todas as marcações de identificação das peças em "X" estavam sempre voltadas para a vista frontal do objeto,

seguindo uma ordem crescente. As chapas em "Y" foram numeradas em sentido horário, indo de 1 a 10, conforme ilustrado nas figuras 26 e 27.

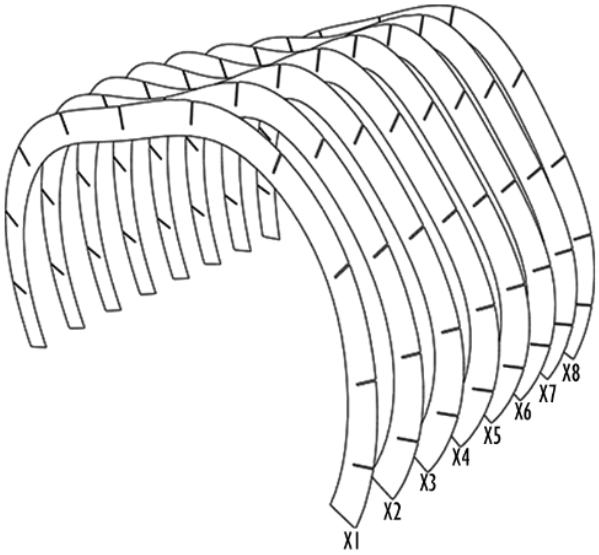


Figura 26 Ordem das peças no Eixo "X".

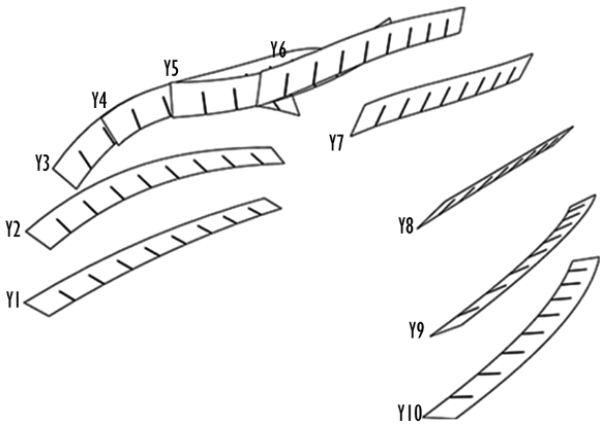


Figura 27 Sentido das peças no Eixo "Y".

Foram demonstradas, ainda no workshop, a identificação de todas as peças, organizadas em *layers* de cores diferentes e em meio virtual na interface do software Rhinoceros. Pretendeu-se, com isso, esclarecer ao máximo o plano de colocação das peças depois que estas fossem montadas. Para isso, foram utilizadas chaves de boca e uma parafusadeira automática para aperto dos parafusos e das porcas junto aos gabaritos nos encontros dos encaixes de Gerber, seguindo-se assim o seguinte plano de projeto proposto (Figura 28).

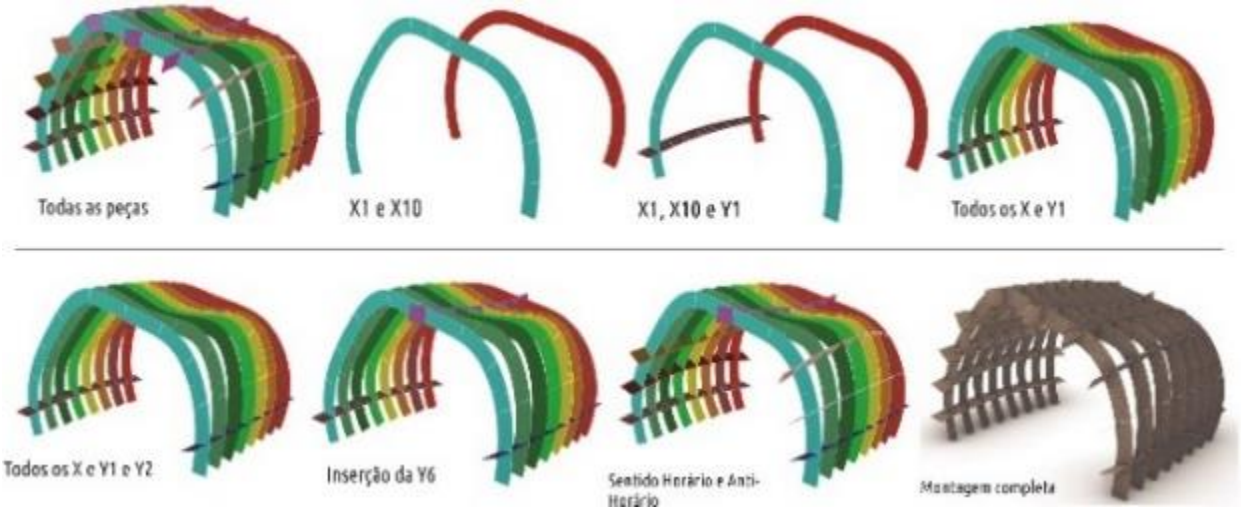


Figura 28 Plano de Montagem.

O plano de montagem teve como princípio a escolha das peças X1 e X10 e do intertravamento com a Y1, para visualização da área a ser ocupada pelo pavilhão dentro do espaço disponível. Feito isso, seguiu-se com a colocação de todas as peças restantes de X, onde os participantes do workshop ficaram responsáveis por segurarem estas peças até que a colocação das peças Y restantes fosse realizada. Nesta lógica, foram colocadas as peças Y2 e Y6 para dar maior estabilidade a estrutura, para que então, seguindo um processo de sentido horário e anti-horário, alternadamente, na colocação das peças Y restantes (Figura 29).

Os encaixes de Gerber e as sapatas propostas para a estrutura se comportaram, de uma maneira geral, conforme o planejado, não havendo dificuldades em sua montagem ou no entendimento de suas funções (Figura 30).

Logo após a montagem completa da estrutura, foram parafusados perfis em "L" (Figura 31) nos intertravamentos das peças, para proporcionar maior estabilidade de contraventamento à mesma.



Figura 29 Montagem do Pavilhão no Workshop realizado.



Figura 30 Peças e detalhes do encaixe de Gerber e das sapatas na base.

Após grande parte da estrutura montada pode-se observar uma resistência da colocação das peças em Y restantes, principalmente as do topo da estrutura. Essas imperfeições dos encaixes foram causadas principalmente por motivos da tolerância adotada nos entalhes das peças (usou-se o mesmo valor de largura dos entalhes e espessura do material MDF, no valor de 9mm); nos esforços laterais do peso próprio (já observados nas simulações físicas através da análise de elementos finitos), que gerava nos encaixes de Gerber um ligeiro afastamentos das conexões feitas, somadas também a resistência do material e de pequenos erros de montagem, também contribuíram para que algumas peças não se encaixassem perfeitamente na estrutura (Figura 32).

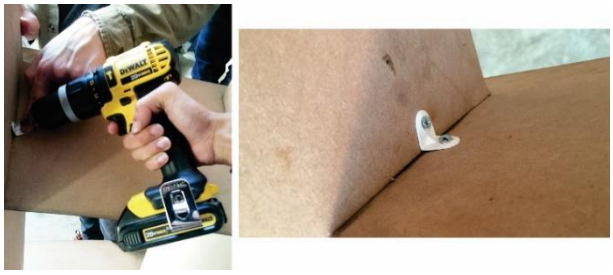


Figura 31 Colocação de cantoneiras em Perfil L nos encontros das chapas.

Ao final do *workshop* o pavilhão foi desmontado para as correções dos ajustes que foram observados na primeira experiência, principalmente pelo fato do mesmo estar localizado em um local de grande circulação de pessoas e ainda não ter oferecido em sua primeira montagem uma segurança de estabilidade estrutural adequada para o mantimento do projeto no local.



Figura 32 Detalhe das tolerâncias das peças.

Ainda assim os resultados finais corroboram as questões centrais apontadas por este trabalho. Na lógica construtiva, seguindo uma mentalidade tectônica potencializada por ferramentas digitais paramétricas, das quais não seriam possíveis ou seriam muito onerosas em tempo de trabalho e provavelmente custo (Figuras 33 e 34).

Essas práticas visam a fortalecer os apontamentos de que essas evoluções tecnológicas quando combinadas, trazem o arquiteto - projetista novamente como o responsável se não por controlar e considerar diferentes aspectos e possibilidades do projeto, em permitir uma maior comunicação e resposta de todos aspectos e levá-los em consideração na criação de projetos mais únicos em comunicação, estética e performance.





Figura 33 Experimento montado.



Figura 34 Experimento montado.

6.9 Segunda Etapa da Montagem Final

A segunda etapa do workshop teve como objetivo a remontagem do Pavilhão *Waffle* após as alterações devidamente observadas na primeira experiência de montagem.

O primeiro passo de retificação da estrutura, foi o aumento da largura dos entalhes de todas as peças (tanto em x quanto em y), para proporcionar uma maior tolerância e facilitar o encaixe das peças. Para o acréscimo dessa tolerância foi usada uma máquina de topia de operação manual, com uma broca de 14mm de diâmetro, aumentando o espaçamento dos entalhes em 5mm aproximadamente (Figura 35). Máquinas de tupia são muito utilizadas para o acabamento de objetos em madeira e capazes de realizar furos, ranhuras e entalhos. O

processo de acréscimo da largura total dos entalhes nas peças foi feito no próprio laboratório de prototipagem da faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFJF.



Figura 35 Experimento montado.

Feito o acréscimo de tolerância dos entalhes, houve uma nova montagem, onde logo no princípio pode-se notar uma maior facilidade no encaixe das peças, tornando o processo muito mais rápido. No entanto, o alargamento dos entalhes provocou uma menor estabilidade da estrutura, sendo necessário uma colocação maior de cantoneiras em perfil "L" no encontro das peças de X e Y.

O resultado das alterações provocou uma maior estabilidade do Pavilhão *Waffle*, possibilitando sua permanência por um maior período de tempo nas instalações da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Juiz de Fora, como mostrado nas Figuras 36 e 37.



Figura 36 Experimento montado.

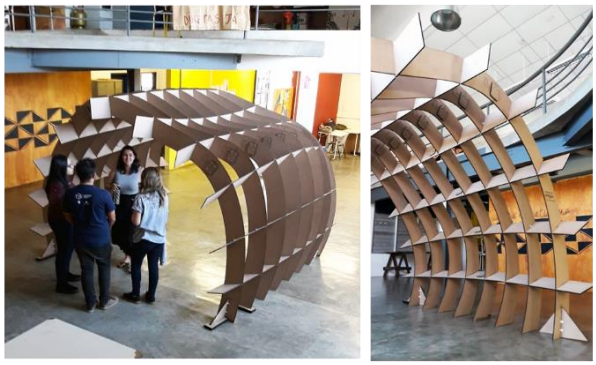


Figura 37 Experimento montado.

7. CONCLUSÕES SOBRE O CASO PRÁTICO

O processo de todo o design e produção do Pavilhão *Waffle* gerou conclusões referentes ao uso de *softwares* e todas as diversas etapas no processo de projeto que se relacionam com a temática de tectônicas digitais. O experimento valida a importância da integração de modelos físicos e virtuais na resolução de problemas estéticos, estruturais e de fabricação, e em como essas muitas etapas fornecem um valioso *feedback* na obtenção de um resultado bem-sucedido.

A aplicação da análise de elementos finitos mostrou-se importante para a previsão de possíveis vulnerabilidades estruturais, que forneceram uma exibição de fácil entendimento por imagens gráficas, diretamente no ambiente de modelagem do projeto e sem a exigência de conhecimento muito aprofundado em análise e cálculo estrutural. Mesmo assim, somente a simulação virtual da análise de elementos finitos não forneceria todas as condicionantes necessárias envolvidas na realização do projeto, como por exemplo a precisão da máquina de corte, montagem e disposição das peças finais, o que certamente demanda experiência prática.

Ainda com todas as limitações apontadas, o uso integrado de definições paramétricas, a produção de protótipos em várias escalas, as análises estruturais e a geração automática de padrões de *layout* para corte a laser em um único ambiente CAD foi muito valiosa para a viabilização da fabricação e montagem da proposta.

Além de considerar as variáveis para geração da forma pretendida para a fabricação, almejando sempre aquela que corresponda mais à relação entre conceito e restrições, deve-se sempre garantir que haja uma percepção de construtibilidade presente. Sem mencionar o potencial custo e tempo envolvidos para a realização do projeto.

Esta é uma importante questão levantada, os desafios da abstração da produção do *design* mediado de maneira digital, como um desafio que vai desde o início do processo até a estrutura construída, ou seja, essa investigação entre o uso de simulações e processos virtuais que permitam o desenvolvimento de estruturas físicas reais para a sua forma construída, como por exemplo:

(1): Compreender as etapas que envolvem a abordagem de design paramétrico, por meio da utilização de softwares generativos e suas potencialidades em contraposição às abordagens tradicionais de produção.

(2): analisar a utilização da Prototipagem Rápida e da Fabricação Digital não apenas para visualização da forma arquitetônica e materialização digital, mas como ferramenta que pode auxiliar no processo de concepção de ensaios e novas explorações formais, estruturais, entre outros. Uma das maiores contribuições observadas no decorrer deste trabalho é a confirmação de que existem diversos fatores que devem ser considerados em todas as etapas de projeto, que não sejam somente aquelas inseridas dentro de um ambiente digital.

No entanto, observa-se que diferentemente do "design digital", o design arquitetônico deve incorporar muitos outros fatores. Por exemplo, projetar e desenvolver projetos de construção que façam uso de ferramentas paramétricas podem, às vezes, ser esteticamente atraentes, mas, em muitos casos, podem se enquadrar em suposições inadequadas e excessivas para responder e reagir no mundo real. Muitos designers, que se envolvem ativamente no projeto paramétrico, até certo ponto concordam em se concentrar mais nas qualidades processuais e nas performances do projeto vinculadas diretamente à forma obtida.

A transparência do processo facilita a comunicação entre as diferentes partes envolvidas no processo de projeto (arquitetos, engenheiros, empreiteiros e artesãos). Desta forma, o pensamento tectônico pode formar a plataforma para estratégias de refinamento e melhoria da indústria de construção contemporânea visto à luz da sustentabilidade, criando um foco claro no processo de design e linguagem comum entre as partes envolvidas.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo das tectônicas em relação com as ferramentas digitais e suas evoluções, demonstram uma grande capacidade em contribuir para a proposição de formas que não somente diferentes e personalizadas, e das quais seriam muito difíceis de serem desenhadas analogicamente, mas também em possuir um processo de projeto mais transparente, que passa a integrar outros aspectos no desenvolvimento e contribuição de agentes diversos.

As relações entre tangibilidade e intangibilidade se aproximam, à medida que é possível, a averiguação de inúmeras possibilidades e a considerar diversos fatores antes da execução do projeto. A relação entre tangível e intangível se aproxima também na medida que aumenta o interesse sobre a tectônica e o digital, e nas capacidades dos *softwares* de modelarem e simularem propriedades e comportamentos de materiais. Estas relações são também distintas, no ponto em que o processo de projeto feito em ambientes digitais é abstrato, e a concepção passa por outra natureza de pensamento e mesmo representação de projeto, que tende a provocar uma ideia de intangibilidade fortalecida principalmente pelas infinitas possibilidades obtidas com os recursos de geração e derivação paramétrica, enquanto o aspecto tangível atua como uma forma de estreitar essas infinitas possibilidades, obtidas principalmente através da transição do digital para o físico no uso de fabricação digital.

Na medida que esses desenvolvimentos de projeto e tecnologias passam a ser mais acessíveis, as tectônicas tendem a fortalecer esta linguagem. A tendência é que se passe a incorporar cada vez mais novos materiais, processos de fabricação e a atender fatores de sustentabilidade, velocidade de construção sem perder em qualidade e singularidade de projeto.

As tectônicas digitais têm um enorme potencial para novas explorações arquitetônicas, que não são somente arbitrárias, mas que resultam em projetos de grande eficiência, precisão e comunicação.

O pensamento tectônico, pode então ser definido como uma atenção central para a natureza do fazer (método de construção) e a aplicação dos materiais necessários, e como esse enfoque forma uma força criativa na conceituação de características que abrangem desde aspectos estruturais ao próprio processo do projeto arquitetônico, pode ser usado para identificar e refinar estratégias para melhorar uma indústria de construção mais contemporânea e sustentável.

REFERÊNCIAS

1. ALEXANDER, C. Notes On The Synthesis Of Form. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos, 1964.
2. ANDERSSON IK, KIRKEGAARD PH. A discussion of the term digital tectonics. Department of Architecture, Aalborg University, Denmark, Department of Civil Engineering, 29 WIT Transactions on The Built Environment, Vol. 90, ISSN 1743-3509 (on-line), 2006.
3. BEESLEY P, SEEBOHM T. Digital Tectonic Design, Promise and Reality: State of the Art versus State of Practice. In: Computing for the Design and Planning Process. 18th eCAADe Conference Proceedings. Weimar, Alemanha, 2000.
4. BEIM A. Tectonic Visions in Architecture. The Royal Danish Academy of Fine Arts, School of Architecture Publishers, Copenhagen, Dinamarca, 2004.
5. BUSWELL RA, SOAR RC, GIBB AGF, THORPE A. Freeform construction: Megascale rapid manufacturing for construction. In: Automation in Construction, 16:2, pp 224-231, 2007.
6. CELANI G, PUPO R. Prototipagem Rápida e Fabricação Digital para arquitetura e construção: Definições e estado da arte no Brasil. Caderno de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. São Paulo, 2008.
7. CHRISTIANSEN K. The latter approach is the approach taken by our platform: Digital Tectonics. Copenhagem, Dinamarca, 2015.
8. COHEN PS. Contested Symmetries: The Architecture and Writings of Preston Scott Cohen. Princeton Architectural Press, Nova York, Estados Unidos, 2004.
9. EISENMAN, P. The formal basis of modern architecture, Tese de doutorado, 378 p., Universidade de Cambridge, Estados Unidos, 1963.
10. ERIOLI A. Aesthetics of Decision: Unfolding the design process within a framework of complexity and self-organization, Design Concepts & Strategies - Volume 1, eCAADe 34, pp. 219 – 228, Oulu, Finlândia, 2016.
11. FIAMMA P. Architecture...from Generative Design. DISEGNARECON, Digital Modelling for Architectural Knowledge, Vol.4, nº 7, pp. 52-61, Bologna, Itália, ISSN 1828-5961 (online), 2011.
12. FRAMPTON K. História Crítica da Arquitetura Moderna. Editora Martins Fontes, São Paulo, 1997.
13. FRAMPTON K. Studies in a Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture. MIT Press, Cambridge Massachusetts, Estados Unidos, 1995.
14. GOLAŃSKI M. Digital tectonics and dynamics in designing of wooden architecture envelopes. 11th Conference on Advanced Building Skins, Berna, Suíça, 2018.
15. HARTOONIAN G. Ontology Construction – On Nihilism of Technology in Theories of Modern Architecture, Cambridge University Press, Cambridge, Estados Unidos, 1994.
16. HENRIQUES GC. TetraScript: Sistema de Aberturas Responsivo para Controlar a Luz, de Acordo com fatores externos e internos. Tese de doutorado, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2013.
17. KIERAN S, TIMBERLAKE J. Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies Are Poised to Transform Building Construction. McGraw-Hill, Nova York, Estados Unidos, 2004.
18. KOLAREVIC B. Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing, Ed. Taylor & Francis, Abingdom, Oxon, 2005.
19. KOLAREVIC B. Designing and manufacturing architecture in the digital age. Architectural information management, 2001.
20. LEACH N, Digital Tectonics. John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, Reino-Unido, 2004.
21. LIMA F, MORAIS V. Relações histórico-conceituais entre representação e projeto: de Alberti à plataforma BIM de trabalho, da abstração ao modelo da informação. In: 2º Seminário Internacional Representar Brasil. Anais do 2º Seminário Internacional Representar Brasil. Vol.1. pp.727 – 736, São Paulo, 2013.
22. MCCULLOGH M. 20 Years of Scripted Space. Architectural Design, 76:4, pp 12-15, 2006.

23. MITCHELL, W. A lógica da arquitetura: projeto, computação e cognição. Tradução de Gabriela Celani. Campinas, São Paulo, 2008.
24. MITCHELL, W. The Theoretical Foundation of Computer-Aided Architectural Design. Environment and Planning B: Planning and Design, Vol. 2, n.2, pp. 127-150, 1975.
25. NARDELLI ES. Arquitetura e projeto na era digital. Arquiteturarevista-Unisinos, Vol. 3, nº1, pp 28-36, São Leopoldo, Brasil, ISSN 1008-5741 (online), 2007.
26. OXMAN, R. & OXMAN, R. Theories of the Digital In Architecture, Ed. Routledge, Reino Unido, 2014.
27. OXMAN, R. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. Design Studies, Elsevier, Vol. 52, pp. 4-39. ISSN: 0142-694X, 2017.
28. ROCKER I. When code matters. Architectural Design, 76, pp 16-25, 2006.
29. SCHUMACHER P. Tectonism in Architecture, Design and Fashion: Innovations in Digital Fabrication as Stylistic Drivers. Architectural Design, 87:6, pp 106-113, 2017.
30. SCHWAB K. The Fourth Industrial Revolution: What it Means and How to Respond. Snapshot, 2015.
31. SEKLER EF. Structure, Construction, Tectonics, In: Ed. Kepes Gyorgy - Structure in Art and Science, Studio Vista, London, 1965.
32. SEMPER G. Die Vier Elemente der Baukunst. Ein Beitrag zur Vergleichenden Baukunde. Braunsweig, Friedrich Vieweg und Son, Alemanha, 1851.
33. SHEA K, AISH R, GOURTOVAIA M. Towards integrated performance-driven generative design tools. Automation in Construction, 14:2, pp 253–264, 2005.
34. SOMOL RE. Dummy Text, or The Diagrammatic Basis of Contemporary Architecture. Risco, 5:1, pp 168-178, 2007.
35. VELOSO PL. Modelagem Digital na Arquitetura Contemporânea: por uma abordagem crítica e conceitual, Anais do Congresso ENANPARQ, Rio de Janeiro, 2010.
36. VIEIRA AK. Design generativo – estudo exploratório sobre o uso de programação no design. Trabalho de Conclusão de Curso, Design, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
37. TERZIDIS K. Algorithmic Architecture. Elsevier, Burlington, MA, 2006.
38. WOODBURY R. Elements of Parametric Design, Routledge, Nova York, 2010.