

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
MESTRADO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO

CAIO AUGUSTO RABITE DE ALMEIDA

**TECTÔNICAS DIGITAIS:  
A (In)tangibilidade no processo de projeto em arquitetura**

Juiz de Fora  
2018

Caio Augusto Rabite de Almeida

**Tectônicas digitais: A (in)tangibilidade no processo de projeto em arquitetura**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Tadeu de Araújo Lima  
Coorientador: Prof. Dr. Marcos Martins Borges

Juiz de Fora

2018

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Almeida, Caio Augusto Rabite de.

Tectônicas Digitais: : A (In) Tangibilidade no processo de projeto em arquitetura / Caio Augusto Rabite de Almeida. -- 2018.

139 p.

Orientador: Fernando Tadeu de Araújo Lima

Coorientador: Marcos Martins Borges

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Ambiente Construído, 2018.

1. Tectônicas Digitais. 2. Parametria. 3. Processo de Projeto. 4. Arquitetura. 5. Fabricação Digital. I. Lima, Fernando Tadeu de Araújo, orient. II. Borges, Marcos Martins, coorient. III. Título.

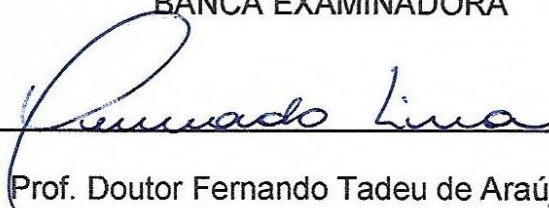
CAIO AUGUSTO RABITE DE ALMEIDA

**TECTÔNICAS DIGITAIS: A (in)tangibilidade no processo de projeto em arquitetura**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído.

Aprovada em 21 de Setembro de 2018.

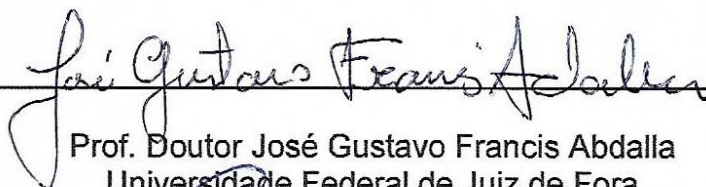
BANCA EXAMINADORA



Prof. Doutor Fernando Tadeu de Araújo Lima  
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Doutor Marcos Martins Borges  
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Doutor José Gustavo Francis Abdalla  
Universidade Federal de Juiz de Fora



p/ Prof. Doutor Gonçalo Castro Henriques  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

## AGRADECIMENTOS

A **Deus** por tudo.

Ao **PROAC/UFJF** – Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora e a todo o grupo de professores, funcionários e colegas de mestrado e graduação que muito contribuíram para a minha formação.

A **CAPES** – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela ajuda financeira realizada através da bolsa de estudos durante meu último ano dentro do programa que permitiu a realização deste trabalho.

Ao **DOMVS** – Laboratório de Investigação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagem, vinculado a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFJF, por todo o apoio com discussões, amizade e participação dentro do grupo de pesquisa.

Ao meu orientador, **Prof. Dr. Fernando Tadeu de Araújo Lima**, pela amizade, pela fundamental contribuição em diversos âmbitos dessa pesquisa, pelos conselhos dados além da própria dissertação, pela paciência e pela confiança na finalização e desenvolvimento de tudo que propusemos.

Ao meu coorientador, **Prof. Dr. Marcos Martins Borges**, por ter acreditado em mim, serei eternamente grato pela oportunidade dada.

Ao **Prof. Dr. José Gustavo Francis Abdalla**, pela amizade, pelas conversas e por toda confiança e inspiração desde o período da graduação.

Agradeço à **minha família**, com amor: a minha **mãe Rita**, **meu pai Marcus**, pelo amor dado, pelos sacrifícios feitos, pelos exemplos passados de caráter, honestidade e pela formação e educação que sempre se esforçaram e conseguiram dar tanto a mim quanto as minhas irmãs. Às minhas **irmãs Camila e Clara**, que sempre estão ao meu lado para todas as horas, e à minha **namorada e amiga Amanda**, pelo amor, carinho, companheirismo e toda sorte que dei de encontrar alguém tão especial.

Aos amigos que ajudaram de alguma forma: **Guilherme, William, Renata, Júnior, Júlia, Aristides, Lorrán, Yann, Matheus, Lucas, e muitos outros. E a todos os participantes do Workshop da construção do Pavilhão Waffle.**



## RESUMO

O conceito de Tectônicas em Arquitetura é uma maneira de se falar sobre o ambiente construído no qual o seu uso, estrutura e experiência estão explicitamente relacionados à materialização e à construção deste ambiente construído. 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 este ambiente construído, incorporando-se assim uma lógica digital ao conceito tradicional de tectônicas. Como resultado, este trabalho é direcionado 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 juntam, em uma série de campos de estudo e em um cruzamento multi escalar de arquitetura, engenharia, computação, análises físicas e experimentações de design e construção.

**Palavras-chave:** tectônicas, tectônicas digitais, processo de projeto, arquitetura paramétrica.

## **ABSTRACT**

The concept of Tectonics in Architecture is 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. In recent years new digital technologies and post-industrial production processes have emerged as supporting tools that modify the way we design, evaluate and produce this built environment, thereby incorporating a digital logic into the traditional concept of tectonics. As a result, this work is directed at the use of parametric computational software for the proposition of an experiment entitled Pavilion Waffle, which was carried out with the combination of variables and digital and constructive parameters, aiming to perceive the potential in which each of these several levels come together in a series of fields of study and in a multi-scalar cross of architecture, engineering, computation, physical analysis and design and construction experiments.

**Keywords:** tectonics, digital tectonics, Project process, parametric, architecture.



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIM	Build Information Modelling (Modelagem da Construção da informação)
CAD	Computer Aided Design (Desenho Assistido por computador)
CAM	Computer Aided Manufacture (Manufatura Assistida por computador)
CNC	Controle numérico computadorizado ( <i>computer numeric control</i> )
DSR	Design Science Research (Pesquisa em Ciência do <i>Design</i> )
FD	Fabricação Digital
NURBS	Non-Uniform Rational Basis Spline
PDT	Parametric Design Thinking
PR	Prototipagem Rápida
STL	Stereolithography (formato de arquivo usado para impressão 3D)
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>ENQUADRAMENTO .....</b>	<b>15</b>
<b>QUESTÕES.....</b>	<b>15</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
<b>OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>16</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>16</b>
<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>17</b>
<b>ORGANIZAÇÃO DESTA DISSERTAÇÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>ESCOLHA DE UM TERMO GENÉRICO .....</b>	<b>21</b>
<b>CAPÍTULO 1 – TECTÔNICAS CLÁSSICAS E TECTÔNICAS DIGITAIS.....</b>	<b>22</b>
<b>1.1 TECTÔNICAS – DEFINIÇÃO CLÁSSICA.....</b>	<b>22</b>
<b>1.2 TECTÔNICAS DIGITAIS .....</b>	<b>27</b>
<b>1.3 RELAÇÕES ENTRE TECTÔNICAS CLÁSSICAS E TECTÔNICAS DIGITAIS ..</b>	<b>33</b>
<b>1.4 A EVOLUÇÃO DO DESIGN PARAMÉTRICO .....</b>	<b>35</b>
<b>1.5. MODELAGEM COMPUTACIONAL NA ARQUITETURA .....</b>	<b>49</b>
<b>1.6. TIPOS DE PROCESSOS COMPUTACIONAIS .....</b>	<b>52</b>
<b>1.7. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....</b>	<b>54</b>
<b>2. CAPÍTULO 2 – PROTOTIPAGEM E FABRICAÇÃO DIGITAL.....</b>	<b>56</b>
<b>2.1. CAD E CAM E A RELAÇÃO COM A ARQUITETURA .....</b>	<b>56</b>
<b>2.2. TIPOS DE FABRICAÇÃO DIGITAL .....</b>	<b>63</b>
<b>2.3. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DIGITAL .....</b>	<b>65</b>
<b>3. CAPÍTULO 3 – CASOS DE ESTUDO.....</b>	<b>68</b>
<b>3.1. PAVILHÃO TETRA SCRIPT .....</b>	<b>70</b>
<b>3.2. SAMBA RECEPTION DESK .....</b>	<b>77</b>
<b>4. CAPÍTULO 4 – CASO PRÁTICO : PAVILHÃO WAFFLE .....</b>	<b>86</b>
<b>4.1 SELEÇÃO DE CRITÉRIOS E PROCESSO DE DESIGN.....</b>	<b>87</b>
<b>4.2 ESBOÇOS E ITERAÇÕES DIGITAIS – A SELEÇÃO DE CRITÉRIOS.....</b>	<b>89</b>
<b>4.2.1 A PRIMEIRA EXPERIÊNCIA.....</b>	<b>91</b>
<b>4.3. PAVILHÃO WAFFLE – PARTIDO INICIAL .....</b>	<b>97</b>
<b>4.3.3 VIABILIDADE, ANÁLISES E SIMULAÇÕES .....</b>	<b>103</b>
<b>4.3.4 PLANEJAMENTO – FABRICAÇÃO, PRODUÇÃO E EXECUÇÃO.....</b>	<b>110</b>
<b>4.3.5 PLANEJAMENTO DO PROJETO EM ESCALA 1:1.....</b>	<b>115</b>
<b>4.3.6 O <i>WORKSHOP</i> DE PRODUÇÃO FINAL ETAPA 1 .....</b>	<b>118</b>

<b>4.3.7 O <i>WORKSHOP</i> DE PRODUÇÃO FINAL ETAPA 2</b> .....	125
<b>4.4 CONCLUSÕES DO CASO PRÁTICO</b> .....	128
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>130</b>
<b>DESDOBRAMENTOS E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	132

## INTRODUÇÃO

Tectônicas digitais, do conceito à (in)tangibilidade. Esta dissertação centra-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 estes 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 digital partindo de referências como: (Kolarevic (2004), Oxman (2017), Cohen (2014), Iwamoto (2009), Celani e Pupo (2008)); inseridas dentro do processo, permitem novas explorações de conceitos e formas que trazem o projetista novamente como 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 das ideias, mas também, e principalmente, como a figura do arquiteto “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 e Morais (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 existe aqui a figura do construtor-mor semelhante à Antiguidade Clássica (LIMA E MORAIS, 2013), em que esses arquitetos pioneiros não estavam somente ligados ao projeto mas também a 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 e Morais (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 representassem, condicionam o arquiteto, como informa Kolarevic (2009), a “projetar somente o que poderia desenhar e a desenhar somente o que poderia construir”, se referindo ao conceito de Mundo Projetual descrito 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 procedimentos apropriados para tal.

Dessa maneira, e ainda segundo Lima e Morais (2013), os recursos de representação, o domínio do desenho como ciência e a arquitetura produzida sempre guardaram uma estrita ligação. Nesta contexto, é possível observar que o desenvolvimento de técnicas e recursos historicamente resultou em novas maneiras de entender, conceber e conseqüentemente, 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.

Esse *design* contemporâneo que transita então entre as fronteiras do físico e do digital, entre a produção e o planejamento, apoia-se na chamada fabricação digital, que vem proporcionando a materialização de ideias desenvolvidas em ambientes paramétricos e generativos, com novas interações entre projetista e ferramentas de projeto, abrindo novos caminhos e proporcionando a capacidade e a possibilidade de desenvolver novas maneiras de projeto e produção.

Sendo assim, a tecnologia da fabricação digital combinada com o *design* computacional, pode 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 estão abrindo novos territórios na exploração de conceitos, formas e tectônicas destas, articulando a morfologia e a topologia arquitetônica focada em propriedades emergentes e suas adaptações. Isto habilita o projetista a produzir e executar formas e soluções complexas que, até há pouco tempo, não poderiam ser materializadas com os meios tradicionais.

Neste cenário, a introdução desta dissertação busca realizar uma apresentação do assunto da pesquisa - as tectônicas digitais - e que serão apresentadas no decorrer deste trabalho, para que posteriormente faça-se uma descrição da metodologia com as motivações, objetivos e o processo metodológico abordado no projeto final que articula e exemplifica o método. Esse trabalho divide-se, assim, em três principais momentos: revisão bibliográfica e atual estado da arte, estudos de caso e experimentações.

A literatura analisada foi a considerada de maior importância para as questões propostas inicialmente no trabalho e capaz de identificar precedentes ao cenário atual do design digital.

Os casos de estudo apontam referências essenciais para se compreender a aplicação contemporânea das teorias e dos conceitos abordados na bibliografia analisada, sendo que foram escolhidos trabalhos que tratam dos temas de design paramétrico, design de interação e fabricação digital, e/ou uma visão unificada destes.

Tal estudo ampara-se, primeiramente, em uma revisão bibliográfica com o propósito de investigação de um cenário que possibilite o entendimento dos conceitos e 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.

Essas inovações tecnológicas que promovem outros processos e formas de se projetar, normalmente utilizando-se de *softwares CAD (Computer Aided Design ou Desenho Assistido por Computador, em português)*, permitiram que arquitetos, designers e engenheiros passassem assim a desenvolver projetos, quase em sua totalidade, em meio virtual, realizando simulações, levantamento de dados e exploração

de formas que, em alguns casos, só são possíveis com o uso da computação no processo.

Tristan Al-Haddad (2009), descreve que:

"A tecnologia sempre foi um agente ativo presente na prática arquitetônica e no discurso teórico atuando conscientemente ou subconscientemente. Os avanços em matemática, fabricação, geometria descritivas e inúmeras outras disciplinas têm conduzido muitos, se não a maioria, dos principais movimentos paradigmáticos dentro da história arquitetônica. As tecnologias digitais estão agora capacitando jovens arquitetos com uma explosão de possibilidades geométricas e espaciais" (AL-HADDAD, 2009).

Conforme Kolarevic (2007, p.7) o debate sobre o uso da computação na arquitetura demonstra a inovação tecnológica da sociedade, do qual esses processos digitais generativos abrem novos territórios para uma exploração conceitual, formal e tectônica.

A integração do projeto com a fabricação digital exclui a necessidade de uma mediação produzida por desenhos manuais, já que com a integração de sistemas CAD/CAM (*Computer Aided Manufacture*), permite-se alcançar níveis mais elevados de personalização sistematizada, trazendo os benefícios da produção fabril para a criação de componentes únicos ou uma série de elementos semelhantes diferenciados por variações controladas digitalmente (KOLAREVIC, 2002). Esse enfoque ao qual a ideia de hibridação entre realidade física e extensão digital, cria potencialmente novos territórios, e uma relação especial com o espaço.

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.

## ENQUADRAMENTO

A investigação em questão se localiza, em um primeiro instante, dentro de uma lógica de pesquisa que passa por questões vinculadas à teoria e a técnicas dentro de meios computacionais voltados para o design.

Assim, esta dissertação procura investigar a capacidade de exploração entre tectônicas “reais” e “digitais” e em como a computação associada ao projeto permite a fabricação de novas formas e conceitos do *design* e da arquitetura. O entendimento do termo “real” neste trabalho parte de uma lógica de tangibilidade, tanto no sentido de algo que é palpável quanto do sentido de compreensão dessa tectônica. Logo, esta pesquisa se concentra na apresentação de conceitos e teorias pertinentes a esta temática, exemplificando os assuntos abordados com a exploração e a iteração de possibilidades construtivas, utilizando-se destes recursos, bem como da consideração entre materiais e técnicas disponíveis, tanto instrumentais quanto relativas ao conhecimento específico do projetista, como matemática e programação. Esta introdução mostra uma primeira perspectiva sobre o tema a ser tratado bem como a estrutura desta dissertação, apresenta as principais questões objetivas e específicas da pesquisa e os procedimentos metodológicos que foram utilizados para a sua realização.

## QUESTÕES

As questões que podem ser suscitadas aqui fazem referência à investigação sobre uma ótica de mudança e relevância do papel do projetista frente a detalhes de projeto e construtibilidade que podem ser vinculados à maneira com que se opera um determinado problema-solução, no específico caso, partindo do âmbito do design computacional<sup>1</sup> e recolocando a figura do arquiteto construtor do período Pré-Renascentista motivado pelas transformações tecnológicas. Dentre estes

---

<sup>1</sup> O design computacional refere-se a uma área de estudo do design que inclui o design gráfico, produto e arquitetônico e tem como objetivo a compreensão e a prática das atividades do projeto por meio da aplicação e desenvolvimento dos conceitos e técnicas originadas da computação, e do qual será tratado com maior detalhe no decorrer deste trabalho.



questionamentos podem ser feitos os seguintes: de que maneira ferramentas computacionais permitem uma intrínseca relação entre *design*, simulação e avaliação do projeto? Qual a viabilidade e os conhecimentos necessários para que seja possível a sua realização? Qual o panorama futuro dos profissionais ligados à área com os grandes avanços de tecnologia e informação? De que maneira esses conceitos podem se associar a outros, para incorporar características relativas ao desempenho?

O campo de pesquisa é muito amplo, bem como sua multidisciplinaridade em se relacionar com muitas outras áreas de análise e influência. O *design* computacional não se restringe ao *software* utilizado e muito menos ao *display* da tela do computador, ele deve ir e vai além. Insere infinitas variáveis que vão do croqui a disposição final do objeto, passando desde características dos materiais até o comportamento do objeto.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste trabalho é o de contribuir para o campo de estudo dos processos de projeto assistidos por recursos computacionais e de fabricação digital, que têm modificado a dinâmica do pensar e do fazer arquitetura, acrescentando novos conceitos, demandas e possibilidades, que se traduzem em novos vocabulários de uma arquitetura contemporânea formada em estreita relação com os processos digitais. Assim, pretende-se contribuir com uma certa organização de conceitos já existentes, com a verificação de projetos que se inserem no contexto apresentado e com experimentações práticas relativas ao ato de se conceber e fabricar um objeto arquitetônico em ambiente de modelagem computacional e de fabricação digital.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Esta pesquisa tem como objetivos específicos a realização de uma investigação das ferramentas que permitem a evidenciação das tectônicas na

<sup>2</sup>arquitetura auxiliada por *design* computacional, que permitem assim questionar sobre a importância e influência da ferramenta no processo, e de que maneira essas técnicas permitem uma análise sobre a própria linguagem arquitetônica que está presente na relação entre ferramentas e processos utilizados do discurso ao conceito final.

Pretende-se, assim, a realização de um projeto prático que envolva esses muitos fatores, permitindo um relato e uma documentação do processo necessário para a construção de uma estrutura semelhante a um abrigo e realizado com recursos de modelagem computacional e fabricação digital, visando a demonstrar os diversos tipos de conhecimento utilizados para a conclusão do mesmo, além de uma avaliação de uma “tectônica” adotada.

Neste sentido, este projeto de pesquisa também possui como objetivos específicos:

a) Perceber o potencial, no contexto apresentado, de uma série de campos de estudo: arquitetura, engenharia, computação, análises físicas e experimentações de design e construção (montagem).

b) Analisar a utilização da Fabricação digital não apenas para visualização da materialização digital, mas como ferramenta que auxilia no processo de concepção de ensaios e novas explorações da forma.

c) Compreender as etapas que envolvem a abordagem de design computacional e suas potencialidades em contraposição às abordagens tradicionais de produção.

## **PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Para a efetivação prática do modelo de estudo abordado dentro do recorte teórico desta dissertação, torna-se necessário conhecimento sobre programação visual e design paramétrico, assim como trabalhos que contextualizam a abordagem metodológica através de: (1) análise contemporânea sobre o estado da arte de estudos

---

<sup>2</sup> Linguagem de Programação Visual (*Visual Basic Language*) é uma linguagem de programação orientada a permitir que pessoas não familiarizadas com linguagens de programação possam ter uma interface de utilização e aprendizado mais fácil. Esse tipo de linguagem está presente em *softwares* de aplicação de programação em arquitetura, como Grasshopper e Dynamo.

sobre a tectônica digital e sua analogia com as primeiras abordagens relacionadas ao tema, e (2) documentação e aplicação do caso prático que visa reforçar e ilustrar os temas aqui tratados. Diante disto, podemos definir a dissertação através das seguintes etapas:

**Construção de quadro teórico-conceitual (revisão bibliográfica):** etapa que envolveu a pesquisa bibliográfica para definição da contribuição teórica a respeito da temática. Os principais estudos relevantes sobre o assunto bem como estado da arte contemporâneo, de maneira que pudesse estruturar a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da pesquisa e a sua inserção dentro de uma discussão pertinente.

O critério de seleção da bibliografia inicia-se na seleção de fontes de pesquisa para encontrar bases de dados com material relevante. A busca foi realizada através de palavras-chave como tectônicas, tectônicas digitais, arquitetura e urbanismo. Não foram encontradas referências em nenhuma base de pesquisa Nacional, como Scielo ou Periódicos CAPES, fazendo com que os critérios de seleção de Bibliografia utilizassem de referências em outras línguas e fontes de pesquisa como Google Academics, Elsevier e principalmente através do portal *Research Gate* e *Cumincad*. A medida que as principais referências eram encontradas, realizava-se uma nova pesquisa com base em suas relações com outros pares. O foco da construção do estado da arte teve como objetivo fontes que tratassem dos conceitos de “tectônicas clássicas” e de “tectônicas digitais”.

Dentre os principais trabalhos levantados que tratam das tectônicas clássicas encontram-se autores como: Frampton (1997), Sekler (1973), Botticher (1843) e Semper (1989). E no que diz a respeito das tectônicas digitais e lógica computacional autores como: Kolarevic (2009), Henriques (2013), Oxman (2007), Mitchell (1975), Leach (2004), Terzidis (2006) entre outros.

**Construção de repertório computacional e de design:** nesta etapa realizou-se a investigação de casos de estudo que fossem aplicadas técnicas algoritmo-paramétricas para a construção de objetos que pudessem servir como referencial de experimentação e repertório para contribuição do tema, das dificuldades encontradas e dos processos que foram realizados.

**Construção do caso prático:** a elaboração do caso prático, pode ser definida como um processo que teve como enfoque a materialização dos conceitos obtidos digitalmente. Neste momento, houve a realização de diversos ensaios físicos e simulações para verificação da possibilidade de realização da etapa atendendo a todos os condicionantes estabelecidos.

A pesquisa possui um forte caráter experimental, aproximando-se das definições de Ciência do Projeto (*Design Science Research*), que segundo Simon (1996, p. 198), pode ser entendida como a possibilidade de estudos sobre o universo “artificial” que se ocupam em como criar e projetar artefatos que tenham as propriedades desejadas e alcancem objetivos definidos, ou seja, como projetá-los (através de um corpo de conhecimento rigoroso e validado) que se dedique à construção de artefatos que atendam a estes objetivos”. Um artefato, conforme LACERDA et al. (2013), pode ser definido como algo que é constituído pelo homem através da interface entre o ambiente interno e o ambiente externo de um determinado sistema.

Sendo assim, é nesta etapa que se dá o cruzamento dos conhecimentos teóricos e práticos obtidos, bem como da interseção entre as ferramentas computacionais e as lógicas construtivas. O resultado é a proposição, o desenvolvimento e a experimentação do artefato que recebeu o nome de Pavilhão Waffle e das aplicações práticas propostas no decorrer deste trabalho.

**Avaliação dos resultados:** esta avaliação pretende descrever o processo de pesquisa que vai desde o problema levantado (matriz de critérios, concepção e lógica construtiva), até os resultados obtidos (desde que atendessem a esses critérios anteriormente levantados). As avaliações dos resultados podem suscitar os seguintes tópicos:

- O artefato (pavilhão) em estado funcional e sua heurística de construção.
- Comparar os contextos experimentais (*mockups*, simulações digitais, iterações) e os reais.
- A formalização das heurísticas contingenciais (descobertas durante o processo).

## ORGANIZAÇÃO DESTA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos, descontando as seções denominadas Introdução e Considerações Finais.

No Capítulo 1, é apresentada uma revisão de literatura que objetiva delinear as bases do conceito das tectônicas digitais, apresentando termos como tectônica e *design* computacional, bem como sobre o papel do designer frente a estes conceitos. É apresentado ainda, um panorama sobre os avanços históricos e teóricos sobre o tema e uma reflexão sobre como diferentes tipos de recursos computacionais permitiram a conceituação do termo tectônicas, apresentando as principais definições, estado da arte, escopo, vantagens e desvantagens neste contexto.

No Capítulo 2, intitulado “Prototipagem e Fabricação digital” é feito um rápido enquadramento sobre diversas formas de produção atuais que envolvem a relação entre desenhos gerados no computador, e a construção destes modelos fisicamente, abordando alguns tipos de máquinas de prototipagem e a especificação do uso de cada uma delas, de maneira a verificar quais recursos poderiam ser utilizados.

No capítulo 3, chamado “Casos de estudos” são apresentados alguns exemplos de projetos em que foram empregadas técnicas digitais no âmbito teórico-conceitual e prático. Esses casos de estudo foram escolhidos de maneira a constituir um referencial de repertório sobre o uso de *design* computacional e da fabricação digital. Foi importante também a escolha de casos em que o processo estivesse com o máximo de informações, principalmente a documentação das etapas necessárias para a conclusão do mesmo.

No capítulo 4, é apresentado o processo em que foram utilizados recursos computacionais e fabricação digital para a concepção e a construção de um objeto piloto, intitulado Pavilhão *Waffle*. Nesta seção é relatada a experiência do projeto até a fabricação do modelo desenvolvido como um produto final da dissertação. Esse capítulo contará com subseções que trarão uma maior explicação sobre as várias categorias envolvidas no processo de *design* proposto, como por exemplo:

- a) Parâmetros e restrições (custo, material, dimensão, escolha do lugar, tempo, maquinário, etc);

- b) Conceito> (desenhos, croquis, etc);
- c) Desenvolvimento do projeto (*script* do modelo, testes formais, testes estruturais, racionalização e planificação),
- d) Testes de viabilidade e maquetes de estudo e por fim, a produção final do pavilhão *Waffle* em escala 1:1.

## ESCOLHA DE UM TERMO GENÉRICO

Para simplificar o entendimento e a fluidez do texto, a utilização de um termo genérico que faça referência ao uso da programação dentro do processo de design em geral, foi escolhido o termo “design computacional”. Porém, caso um determinado assunto esteja relacionado com outro tipo conceitual de processo, como por exemplo, conceitos de design paramétrico ou design generativo o termo será utilizado e explicitado em contraponto ao genérico.

A escolha por essa opção não é a de criar novos conceitos de design, já que há no momento um grande volume de termos e palavras chaves que possuem enfoques muito semelhantes entre si.

Além do termo definido anteriormente, é possível encontrar alguns outros que tratam de áreas semelhantes das quais fazem uso de programação como ferramenta dentro do design, além dos mencionados anteriormente como por exemplo: design algorítmico, design procedural, design condicional e design associativo.

## CAPÍTULO 1 – TECTÔNICAS CLÁSSICAS E TECTÔNICAS DIGITAIS

Este capítulo tem como principal objetivo tratar sobre o tema chave dessa pesquisa, que versa sobre o levantamento do estado da arte sobre tectônicas e como esses conceitos estão ligados com a atual difusão de avanços tecnológicos dentro da área de arquitetura e construção civil. Esses levantamentos bibliográficos e teóricos traçam um histórico que demonstra que o próprio avanço dos estilos arquitetônicos, esteve intimamente correlacionado com ferramentas disponíveis e métodos de representação do projeto. A pesquisa tenta identificar o termo “tectônica” de uma forma abrangente dentro do escopo de trabalho, coletando e categorizando definições existentes do conceito e sua utilização através de momentos distintos do tempo pela definição de diferentes teóricos.

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 experiencia-se uma obra de arquitetura.

Tectônicas são uma palavra chave que tem sido utilizada com grande frequência pelos maiores expoentes do movimento arquitetônico contemporâneo, e tenta-se aqui, compreender quais são os conceitos que definem esse termo, seja no viés clássico ou seja no viés digital, com as suas particularidades, semelhanças e comparações evolutivas.

### 1.1 TECTÔNICAS – DEFINIÇÃO CLÁSSICA

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*”<sup>3</sup> 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.

Infinitos debates e teorias tentam encontrar uma resposta para responder a pergunta de quais seriam as características que definiriam um objeto como “arquitetura”. Em paralelo a essas discussões, as analogias a linguagem transmitida são variadas e inevitáveis na história da mesma. O fato é que, independentemente da função, escala ou forma, ela é capaz de significar alguma coisa para alguém. E é exatamente o que essa chamada “linguagem arquitetônica” é responsável por passar, ainda que este significado seja extremamente amplo, complexo e aberto a diálogos e interpretações. Tal significado é inevitavelmente associado pelo tipo de processo de produção da arquitetura, por quem é o responsável pelas etapas de produção desta arquitetura, pelas relações entre o contexto e a disposição final desse projeto, pelas suas inter-relações com outros elementos da expressão arquitetônica, e finalmente sobre como cada um desses muitos indivíduos percebe e observa a construção final e as particularidades de sua tectônica.

O conceito de tectônica bem como a utilização de seu termo, tem sido frequente nos estudos sobre arquitetura durante vários séculos. Como citado anteriormente a palavra 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”.

---

<sup>3</sup> Na filosofia, *poiesis* (do grego antigo (clássico) é a atividade na qual um indivíduo cria algo ou a maneira de se fazer algo que não existia anteriormente. A etimologia da palavra é derivada de um termo que significaria “como fazer”. A palavra também é usada como sufixo, como por exemplo no termo biológico *hematopoiesis*, que seria a formação de células sanguíneas.



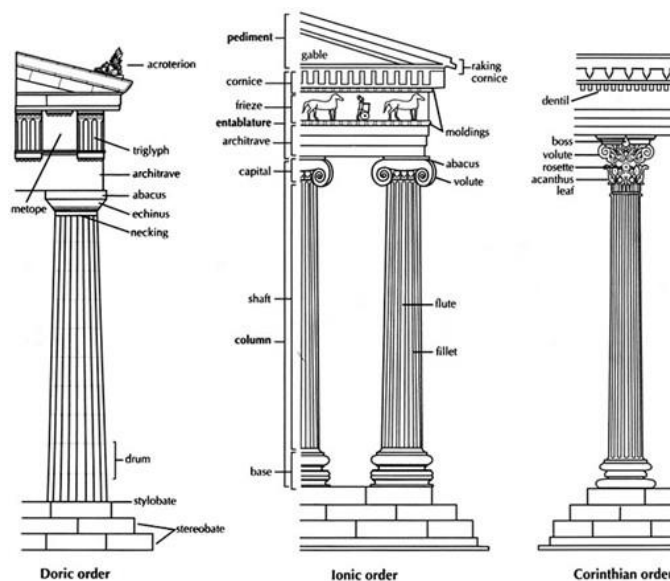
Em um estudo de 1973 denominado “estrutura, construção e tectônicas”, Eduard Sekler definiu no seu trabalho a tectônica como uma expressividade acerca das resistências estáticas das formas construtivas de tal maneira que a resultante dessa expressão não poderia ser desassociada em termos de estrutura 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: <http://www.visual-arts-cork.com/images-applied-art/greek-columns.jpg> acesso realizado em: 19/01/2018

Sob essa luz, é interessante observar o conceito de tectônica, definido por Gotfried Semper, que qualificou uma compreensão contemporânea do conceito. Dois aspectos de suas teorias tectônicas são particularmente interessantes. Em primeiro lugar, ele define a tectônica como resultado do trabalho artístico consciente (SEMPER, 1989). Em segundo lugar, ele vê os aspectos tectônicos da arquitetura em relação às propriedades do material e ao projeto das construções, enquanto para ele as dimensões funcionais da arquitetura recebem menos atenção.

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. Ele divide o edifício em quatro elementos fundamentais; que são todos técnicos ou simbólicos (Hartoonian, 1994). Além disso, a Semper considera que o nó é a parte construtiva mais antiga e mais original. Portanto, a articulação é crucial para Semper, e em sua opinião, é fora das transições entre elementos de construção, que a beleza da arquitetura emerge.

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. Portanto, o pensamento de 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); A visão da arquitetura através de uma lente tectônica busca retratar a integração poética da montagem, materialidade, representação, espaço e ambiente.

Tomando essas definições como exemplo, podemos resumir que o termo faz referência aos aspectos concretos e abstratos inseridos dentro da arte de se construir algo.

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. Semper e Frampton propõem principalmente que o conceito de um prédio seja informado através das transições – “as juntas”, enquanto Bötticher e Sekler são mais gerais em sugerir que a construção é articulada, respectivamente, por uma unificação entre o conceito e a intensificação por tectônica.

## 1.2 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 retarda 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.

Por quase vinte anos, uma arquitetura digital de diferentes temáticas e personagens foi produzida. Através deste tempo, tornou-se possível desenvolver formas novas geometricamente livres, bem como calcular e simular diferentes questões técnicas de futuras construções usando ferramentas digitais. Os conceitos de construção mais complexos e inovadores podem ser realizados através de programas de modelagem e desenho tridimensionais, e isso naturalmente fascinou os arquitetos. Muitos dos projetos concebidos digitalmente são caracterizados por esse fascínio da geometria de forma livre. Nas discussões contemporâneas da arquitetura digital, a tectônica é um termo recorrente no discurso de quem a produz.

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.

Um dos pioneiros a fazer uso do conceito de tectônicas em conexão com o movimento de design baseado em ferramentas digitais foi o arquiteto e pesquisador Neil Leach, em uma antologia intitulada *“Designing for a Digital World”* (2002) seguida por um acompanhamento de título *“Digital Tectonics”* (2004) . De acordo com o próprio Neil Leach (2004), o título pretendia ser uma reapropriação estratégica do termo “tectônica” da maneira mais conservadora da que Frampton havia usado em seu livro *“Studies in Tectonic Culture”* (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.

As 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).

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. Novas ferramentas permitem gerar geometrias adaptando-se a condições de fronteira variáveis sendo desde demandas estruturais, condições de iluminação ou concepções formais. Essa introdução de meios digitais para a representação e desenvolvimento de projetos, permite desenvolver formas novas e geometrias livres, que possibilitam novas questões técnicas que anteriormente não eram viáveis ou mesmo imaginadas (Anderson & Kinkergaard, 2006).

Para Fiamma (2011), essas formas computacionais de se conceber e projetar, a forma, envelopamento, estrutura, desempenho e materiais, são concebidos, verificados e construídos instantaneamente, reduzindo assim as lacunas tradicionais ocasionadas entre a fase de projeção e a fase de construção, realizando-se assim o questionamento, se utilizando-se de espaços virtuais do computador para formas análogas de processo ocorridos na natureza, contribuem assim para uma direção a uma arquitetura composta de "tectônicas digitais", onde os dados não seriam somente

componentes que contém informações, mas poderiam ser considerados como formas de arquitetura, pertencentes a um determinado meio utilizado durante todo o decorrer do processo.

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 (BEESLEY & SEEBOHM, 2000).

As novas abordagens digitais para o design arquitetônico (arquiteturas digitais) baseiam-se em conceitos computacionais como espaço topológico (arquiteturas topológicas), superfícies isomórficas (arquiteturas isomórficas), cinemática e dinâmica de movimento (arquiteturas animadas), animação de formas chave (arquiteturas metamórficas), design paramétrico (arquiteturas paramétricas) e algoritmos genéticos (arquiteturas evolutivas), conforme abordado por Kolarevic (Kolarevic 2000).

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 necessariamente 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).

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. Sendo assim, faz-se o questionamento do que poderia ser entendido como tectônicas digitais? Essa pergunta pode ser descrita em diversas maneiras para se exemplificar e conceituar o termo, com suas discrepâncias e similaridades entre os dois meios, digital e real. Assim como no caso da tectônica, existem inúmeras opiniões diferentes sobre como o termo de tectônica digital deve ser interpretado. Uma das sugestões de como descrever o termo tectônica digital é "a poética da arquitetura digitalmente concebida, estruturalmente esclarecida e fabricada diretamente" (JABI, 2004).

Isto se deve, como observa Heidegger (1994), ser a pedra angular em toda a estética, e a interação entre construção e material é, obviamente, um aspecto importante de revelar a verdade da natureza das cargas, forças e propriedades materiais - nela se encontra toda a compreensão do que significa construir e construção. Assim, propõe-se que as questões centrais em termos de tectônica digital sejam: Interação entre material e construção e estrutura clara e lógica.

Podemos observar a tectônica digital como um design sistemático de coordenadas geométricas e espaciais, que são utilizados para combinarem com componentes diretamente relacionados à forma de se construir, onde o computador é o meio utilizado para geração de formas e a construção desses sistemas (BEESLEY & SEEBOHM, 2000).

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 de tecnologias eletrônicas e digitais. A tectônica digital é, portanto, um



conceito que realiza uma nova abordagem quando se trata de metodologias e conceitos do design arquitetônico atual.

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.

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. Os exemplos mais conhecidos são a indústria da animação, automobilística e a aeronáutica.

Desse modo, a compreensão das especificidades e distinções dos modelos digitais é necessária para se investigar as interferências na criação dos objetos pretendidos, que permitem a compreensão das várias possibilidades de prototipagem e fabricação relacionadas a determinadas tectônicas, e em como essas tecnologias associadas, criam uma espécie de “estilo arquitetônico” que vem sendo muito adotado nos discursos de concepção dos projetos contemporâneos.

Com essa mudança do ponto de vista estético e técnico causado pelo design digital, Kolarevic (2003) apresenta o conceito de arquitetura performativa. Termo que implica basicamente que a arquitetura possui características “específicas para cada especificidade”, ou seja, ela leva em considerações situacionais e locais para seu funcionamento, como condicionantes de acústica, clima ou tipo de usuário. Quando combinada com características técnicas e aspectos teóricos e de representação durante o processo, onde essas análises técnicas são levadas em consideração, elas influenciam na forma e materialidade do projeto, e o processo como um todo implicará em um resultado final com grande potencial tectônico.

Philip Beesley e Thomas Seebohm também se relacionam com o ontológico e o representacional, ao argumentar que a tectônica digital é "um uso sistemático de ordenanças geométricas e espaciais, usado em combinação com detalhes e componentes diretamente relacionados à construção contemporânea" (Beesley e Seebohm, 2000).

Por isso conta disso, eles sugerem que o arquiteto deve trabalhar com estruturas geométricas, como base ou ideia principal para a construção, e depois usar os conhecimentos e tecnologias disponíveis para comunicar essas noções e estruturas através do design concreto de detalhes e componentes.

Conclui-se que nem as sugestões de Kolarevic nem as de Beesley e Seeböhm são muito diferentes das descrições anteriores dos teóricos clássicos da tectônica como Semper e Frampton 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 “*tekon*”, que pode visualizar e controlar todos os aspectos tecnológicos e estéticos do edifício.

### **1.3 RELAÇÕES ENTRE TECTÔNICAS CLÁSSICAS E TECTÔNICAS 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 do digital e da tectônica, sugere-se que a tectônica digital se dê como mistura 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).

#### **1.4 A EVOLUÇÃO DO DESIGN PARAMÉTRICO**

Como Kolarevic (2000) descreve, 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.

Essas novas possibilidades de criação de projetos alavancados por softwares CAD/CAM que possibilitam formas geometricamente livres inspiram muitos arquitetos e designers a realizarem experimentações formais não convencionais. Isso provoca algo semelhante a uma ruptura de linguagem que é causada por essa emergência das ferramentas digitais de apoio ao projeto, resultando em uma arquitetura que rejeita a noção de continuidade, morfologia e tecnologia estrutural.

O design paramétrico, diferentemente do que muitos pensam, está presente no design e na arquitetura desde seus primórdios, porém de maneira analógica (TERZIDIS, 2006), 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.

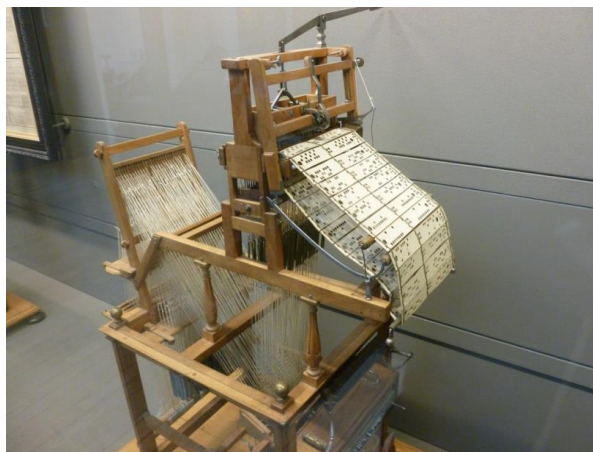
A investigação da grande arquitetura renascentista, por exemplo, frequentemente mostra diagramas de elementos clássicos da arquitetura (colunas, arcos, etc.) em que as dimensões não são classificadas com valores fixos, mas com expressões que definem estes valores como funções de alguma variável importante, 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.

Este termo design paramétrico, tem sido aplicado analogicamente quando se trata de conceitos em arquitetura e design, por ter uma grande abrangência relacionada

a esse tipo de processo de desenho, que insere conceitos tais como: gramática da forma, design generativo, arquitetura algorítmica e parametricismo.

Práticas processuais com pensamento paramétrico embutido no conceito e na forma de trabalho utilizando-se de informação e tradução de dados não são termos tão novos quando abordamos essas temáticas. Segundo Stabile (2015), o exemplo mais antigo de transposição de informação para dados é a invenção do cartão perfurado de Joseph-Marie Jacquard, no ano de 1804. A máquina do inventor mecânico francês é tratada como um dos momentos pioneiros em que informações se tornaram dados, ou seja, foram capazes de serem armazenadas e organizadas. O invento tinha como objetivo principal guardar posições determinadas dos teares automatizados na indústria têxtil, como uma espécie de gabarito, ao qual a posição dos furos determinava também o posicionamento das peças desses teares. Posteriormente os cartões perfurados de Jacquard, serviram de base para avanços de automatização de tarefas e passaram a ser utilizados em várias outras atividades, principalmente no que tange a produção em larga escala durante o século XIX.

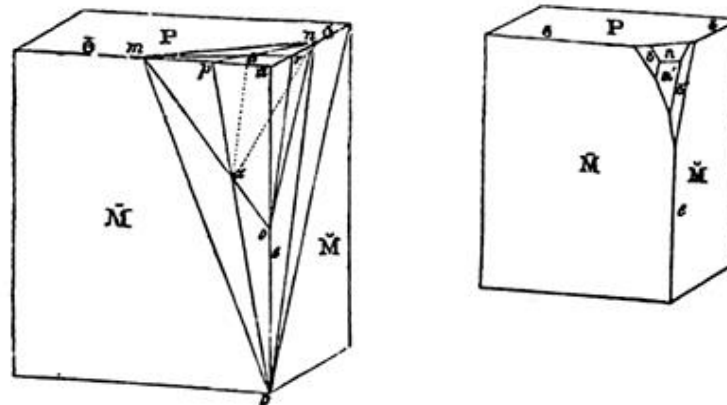
Figura 2 – Tear mecânico de cartões perfurados de Jacquard.



Fonte:<https://goo.gl/wqz55U>

A etimologia da palavra paramétrica provém de coordenadas que exprimem um ou mais parâmetros. Segundo DAVIS (2017), no ano de 1837, o termo “*parametric ratio*” (relação paramétrica) foi utilizado por James Dana em um artigo denominado “*On the drawing of figures of crystals*” no qual descrevia o processo de desenho manual de cristais, e ao qual determinava relações de proporções variáveis entre o desenho e as partes do cristal.

Figura 3 – Ilustração com as relações geométricas paramétricas em cristais de Dana (1837).



Fonte: <http://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>

Um importante e possivelmente primeiro e mais reconhecido arquiteto a utilizar de práticas processuais entre design e arquitetura, com conceitos de parametria foi o arquiteto catalão Antonio Gaudí, conhecido pela complexidade geométrica e formal de suas obras.

Figura 4 – Modelo de correntes suspensas por Gaudí.

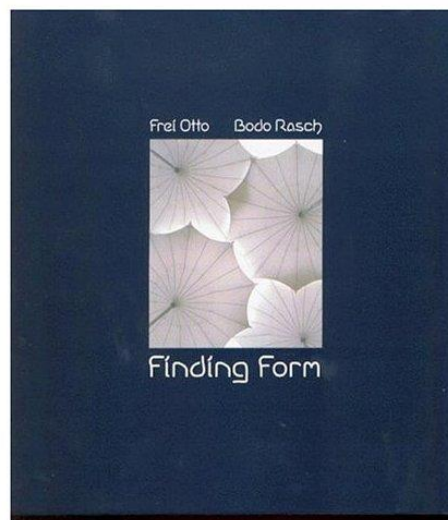


Fonte: <https://goo.gl/bDL3Gm>

Outro arquiteto a utilizar de cálculos e lógicas para criação de arquiteturas foi o arquiteto alemão Frei Otto, que se baseava em analogias formais a natureza e biologia hoje mais conhecidas como biomimetismo, e assim como Gaudí, fazia uso de

parâmetros que eram descritos previamente e que permitissem a exploração de soluções à medida que parâmetros fossem modificados. Esse processo foi denominado por ele como “*form finding*”, no qual o processo consiste em utilizar-se de uma matriz lógica que era a estrutura da forma, e com a mudança de valores fosse possível criar outras variações daquela matriz inicial. Em meados dos anos 50, novas descobertas em comunicação e eletrônica, mudam da manipulação de dados para a cibernética, interação e comunicação. Esses processos descritos por Otto, foi um dos precursores do chamado desenho generativo tão em voga no design contemporâneo.

Figura 5 – Capa da obra Finding Form de Frei Otto (1995).



Fonte: <https://morphocode.com/wp-content/uploads/2010/03/Cover1.jpg>

Outro exemplo de método projetual que permite uma analogia de processos paramétricos empregadas na arquitetura, é o conceito da gramática da forma que foi proposto por Stiny and Gips, em 1972.

Inicialmente como uma ferramenta de pintura, seu princípio básico vem do sistema de produção do matemático Emil Post (1943) e na gramática gerativa do linguista Noam Chomsky. Uma gramática formal é uma estrutura computacional capaz de descrever uma linguagem formal por meio de regras e um alfabeto prévio.

Somente anos mais tarde, na década de 80, foi que o conceito 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. 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. Além de auxiliar a geração de formas arquitetônicas, é usado também como ferramenta de análise em estudos de linguagem arquitetônica.

A Gramática da forma é um processo específico de parametrização de projetos. Assim como a gramática relacionada a linguística, uma série de regras são estabelecidas para a conformação de formas diferentes, porém que compartilham da mesma origem de linguagem de criação.

Segundo Duarte (2011) há dois tipos de classificação da gramática da forma: as analíticas e os originais. As analíticas podem ser entendidas como aquelas que têm como base objetos existentes ou obras arquitetônicas históricas, e têm como objetivo o descobrimento de regras recorrentes utilizadas por seus autores. Já as gramáticas originais são aquelas criadas especificamente para algum projeto a ser desenvolvido.

“A gramática da forma pode ser entendida como expressões matemáticas para mecanismos computacionais que dirigem o processo de formação da forma através de regras de transformação” (OXMAN, 2005 p.255).

As gramáticas da forma são muito importantes para o design atualmente, ainda mais quando falamos nos novos métodos produtivos industriais de customização em massa. Neste sentido, as gramáticas permitem a criação de infinitos resultados formais, diferentes entre si, porém podendo apresentar em cada opção uma peculiaridade controlada ou não (STABILE, 2015). O método mais avançado de gramática da forma atualmente é o que chamamos de *form fitness*. O *form fitness* é um processo capaz de escolher a melhor opção formal entre diversos resultados, de acordo com algum critério predeterminado. Contudo, o *form fitness* deve ser por natureza ser um processo que permita emergência, ou seja, o próprio algoritmo sofre alterações durante o processo, sempre com a finalidade da busca da forma ideal (STABILE, 2015).

Uma outra importante figura para o desenvolvimento do desenho e da lógica paramétrica dentro da introdução da informática no processo de projeto, foi o cientista da computação Ivan Sutherland, que em 1963, cria o primeiro *software* paramétrico de desenho assistido por computador (CAD), denominado Skeetchpad, que era basicamente uma interface que interagia com uma caneta de luz, que permitia que o



usuário através de uma linguagem de programação visual traçasse linhas e arcos diretamente na área gráfica do programa, permitindo relacioná-los entre si, e do qual Sutherland segundo Davis (2013) nomeou de “*atomic constraints*” ou traduzindo de maneira semelhante a restrições atômicas, e que baseavam-se em princípios de equações paramétricas, obtendo formas variadas através de regras como paralelismo, ortogonalidade e coincidência. Essas restrições atômicas desenvolvidas por Sutherland, só vieram a ser implementadas pelo AutoCad em sua versão de 2010, o que demonstra o pioneirismo das ideias e da invenção do Sketchpad pelo cientista da computação em 1963.

Figura 6 – Ivan Sutherland utilizando sua invenção o Sketchpad em 1968.



Fonte: <http://history-computer.com/ModernComputer/Software/Sketchpad.html>

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”.

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. Os modelos digitais são, portanto, instrumentos codificadores, isto é, abstrações matemáticas que reduzem e interpretam fenômenos ou ideais em uma sintaxe numérica que pode resultar em imagens, diagramas, animações, sons e desenhos automáticos (VELOSO, 2010).

Essas motivações originaram o sistema BIM, que é basicamente um sistema paramétrico no qual as informações de projeto estão diretamente inseridas dentro de geometrias e entidades tridimensionais. 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 e automóveis ou produtos.

O advento da computação propiciou a troca de enormes volumes de dados além de disponibilizar toda uma gama de informações à disposição dos profissionais para serem usadas na elaboração do projeto. Outra vertente viabilizada pela computação é a possibilidade de experimentação seja no uso de formas inusitadas ou estilos inovadores de projetar.

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.

As linguagens visuais de programação ganharam força nos anos 2000, e hoje configuram o principal meio de programação para profissionais vindos de outras áreas que não a de programação (STABILE, 2015).

O design paramétrico começou 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.

Segundo o dicionário Aurélio, o termo parâmetro é definido como:

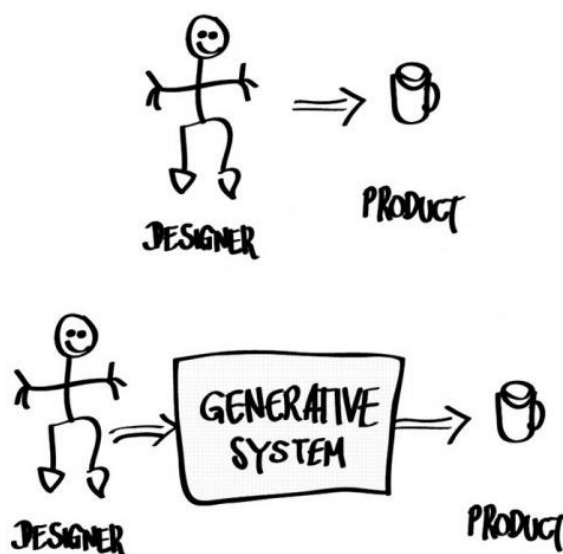
1. Mat. Variável ou constante à qual, numa relação determinada ou numa questão específica, se atribui um papel particular e distinto do das outras variáveis ou constantes.

2. Mat. P. ext. Todo elemento cuja variação de valor modifica a solução de um problema sem lhe modificar a natureza.

O design atual embasa-se em dois princípios matemáticos de variáveis e algoritmos para as evoluções de técnicas digitais em arquitetura. As variáveis segundo Stabile (2015), são mecanismos matemáticos capazes de criar relações proporcionais sem a menção de valores absolutos, ou seja, estabelecem relações paramétricas entre duas ou mais entidades.

Um sistema generativo é um método indireto do projeto, no qual o projetista não se preocupa apenas com a solução de um problema em particular em um contexto específico. Ele (ou ela) procura criar um projeto mais ou menos genérico, que possibilite resolver problemas semelhantes em contextos diferentes (CELANI, 2011). Segundo Mitchell (1975), um sistema generativo permite “produzir uma variedade de soluções potenciais”. A ilustração de Fischer e Herr (2004) (Figura. 7) é muito utilizada para descrever esta abordagem de maneira visual, comparando-a com a abordagem tradicional de projeto.

Figura 7 – Diagrama de Fischer e Herr (2001) comparando o processo tradicional de projeto ao processo generativo.



Disponível em: <https://goo.gl/Cuy1oq>. Acesso em: 18/08/2018.

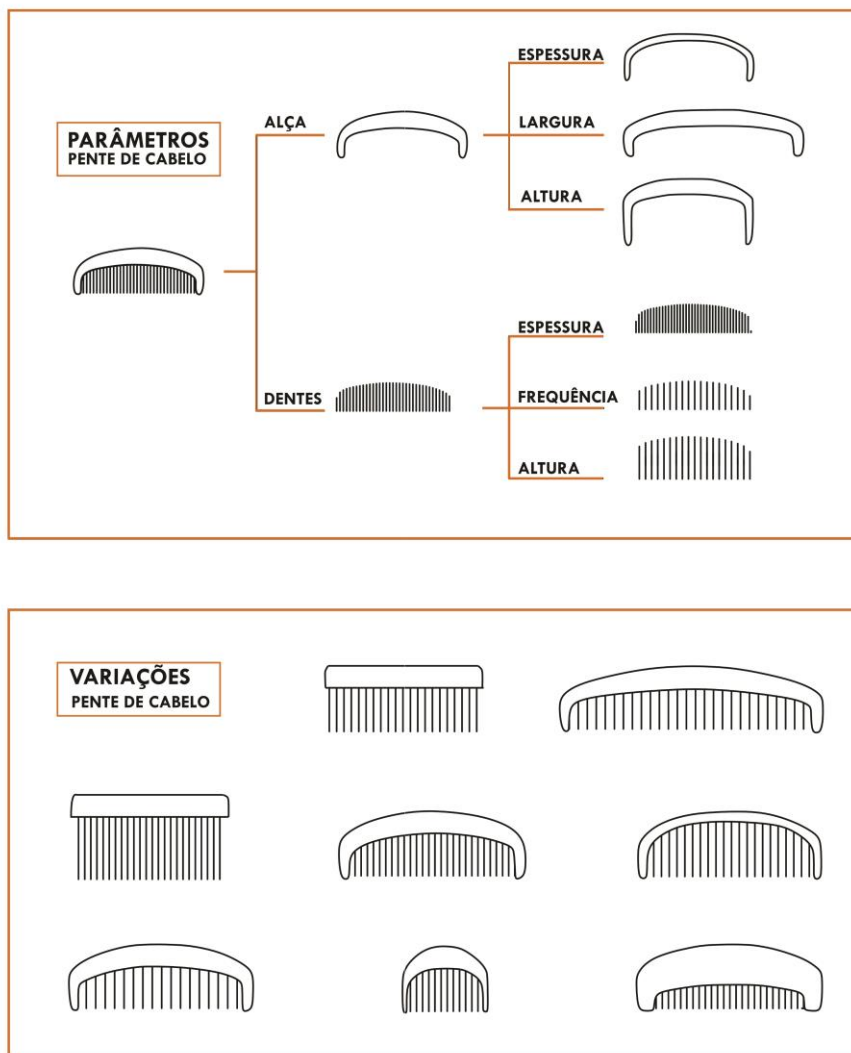
Segundo Celani (2011), um sistema generativo pode ser utilizado visando à otimização (convergência) ou à variedade (divergência), por meio da geração de múltiplas alternativas. Em determinadas situações o objetivo pode ser a geração de uma grande diversidade de opções dentro de uma linguagem, seja para a exploração criativa de ideias, seja para a criação de famílias de objetos. Essas sequências de instruções precisas são chamadas de algoritmos – daí o nome “projeto algorítmico” ou *algorithmic design*.

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)

O site “Parametric Camp” ainda diz que “o fundamento do design paramétrico é a geração de geometria a partir da definição de uma família de parâmetros iniciais e o delineamento de relações formais que eles mantêm entre si.”

Para melhor exemplificar esse pensamento, a figura 5 demonstra uma analogia de um pente e algumas de suas características como: espessura, largura da alça, altura dos dentes, etc). Inseridos em um sistema paramétrico, cada um desses atributos seria controlado por um determinado parâmetro, e na medida em que se altera algum desses parâmetros é modificado o produto final, gerando assim inúmeras possibilidades.

Figura 8 – Diagrama com a relação entre Parâmetros e Variações em pentes de cabelo. Analogia com a lógica paramétrica.



Fonte: Elaboração própria.

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.

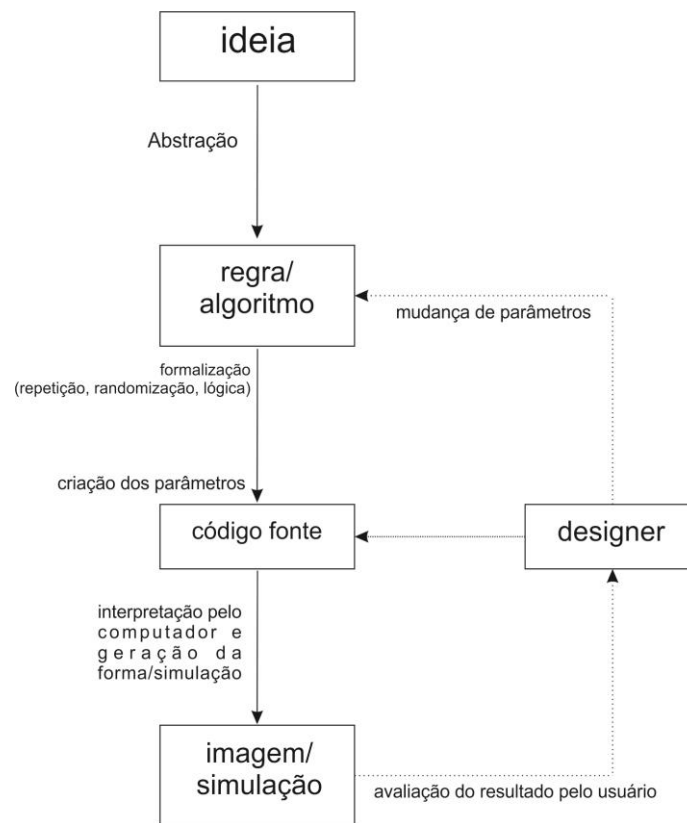
Os algoritmos podem ser definidos, segundo a Wikipédia, “Um algoritmo é uma sequência finita de instruções bem definidas e não ambíguas, cada uma das quais pode ser executada mecanicamente num período de tempo finito e com uma quantidade de esforço finita”. Uma definição mais simples é encontrada no 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.

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.

As definições automatização e codificação, ocasionadas pela combinação de algoritmos através de programação, alertam para o fato dos modelos digitais não serem artifícios alheios ou indiferente aos processos de criação da Arquitetura. Afinal, se o projeto se baseia na estruturação de conceitos e ideias, isto é: na síntese de informações visando problematizar e solucionar uma realidade, a utilização de um instrumento que disponibiliza modos distintos de acesso e articulação do conhecimento induz novos enquadramentos e processos criativos (VELOSO, 2010).

Figura 9 - Representação do processo de design com uso de programação.



Fonte: Adaptado de BOHANCKER, 2012 p.46

Os métodos de modelagem paramétrica requerem um nível de abstração maior do que nos processos tradicionais de design. Para Celani & Vaz (2011) no nível de representação, um designer deve entender novos conceitos como a lógica da programação de computadores, diagramas paramétricos de um processo generativo e um conjunto de ferramentas matemáticas, como geometria descritiva e álgebra linear e ainda poucos profissionais estão aptos para estes desafios. É preciso desenvolver explicitamente relações entre componentes de design e codificá-los no diagrama abstrato. Qualquer processo de modelagem paramétrica requer uma grande quantidade de conhecimento explícito e esforço antecipado para criar um diagrama paramétrico que defina a estrutura relacional dos componentes de projeto.

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.

Devido a significativos desenvolvimentos tecnológicos recentes relacionados ao design, as teorias e processos de design estão passando por uma reformulação e uma mudança epistemológica (OXMAN, 2017). Os sistemas de projeto paramétrico hoje podem se adaptar ao contexto em mudança (Woodbury 2010) sob a influência de linguagens paramétricas e técnicas de *script* (Jabi 2013) para diversas relações topológicas e processos gerativos de design (Oxman 2006).

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 (OXMAN, 2017).

O pensamento de projeto paramétrico pode ser definido como tendo três características: pensar com abstração; pensar matematicamente e pensar algorítmicamente (Woodbury, 2010). A combinação dessas três características é o que pode ser definido segundo Oxman (2018) como o conceito de PDT.

Essa abordagem torna-se duplamente pertinente no contexto contemporâneo. Afinal, tanto a ênfase nos processos – em detrimento do objeto – é um dos temas marcantes da Arquitetura contemporânea, quanto a tecnologia por ela experimentada – a digital - é, em essência, uma tecnologia associada ao processamento de informações. Portanto, a incursão nessa relação entre projeto e tecnologia digital é uma abordagem necessária para se compreender a produção atual e esclarecer muitos dos dilemas tecnológicos em pauta.



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). Se por um lado isso pode parecer, à primeira vista, uma limitação, por outro permite que um mesmo projeto seja submetido a diversas hipóteses de análise e garante respostas improváveis e inesperadas.

Em síntese, a utilização de expressões paramétricas possibilita uma variedade de formas geométricas que variam entre si, estabelecendo relações que podem ser alteradas de maneira conjunta ou singular. Todas se baseiam no uso das linguagens de script existentes em programas de CAD e tiram vantagem das funções geométricas presentes nesses aplicativos.

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, conseqüentemente, as premissas de projeto que incorporam todas estas complexidades e dinâmicas.

### **1.5. 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.

Sistemas 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.

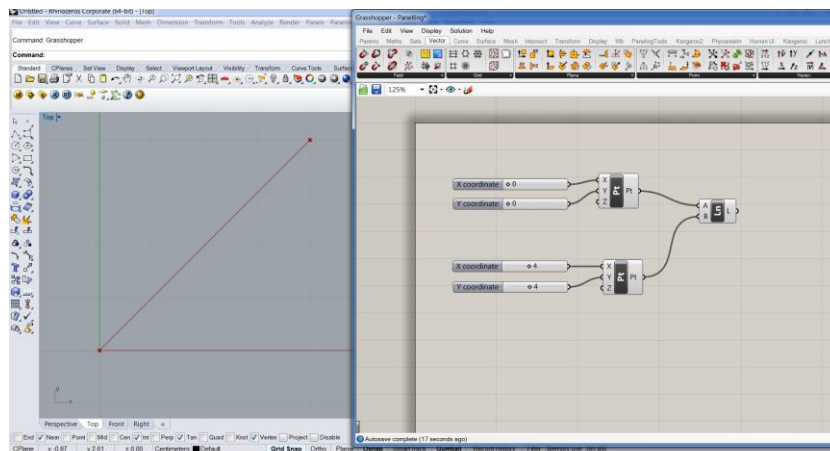
Alexander (1971), baseado na teoria dos grafos e dos conjuntos, e Eisenman (1963), inspirado pela desconstrução de Deleuze e Derrida, usaram diagramas para representar projetos. De acordo com Somol (1999), na segunda metade do século XX o diagrama se tornou uma técnica e um procedimento fundamental no 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 redesenhada na área de trabalho do Rhinoceros.

Figura 10 - Demonstração de um desenho simples de linha na janela do Rhino (à esquerda) e seu plugin Grasshopper (à direita).



Fonte: elaboração própria.

No Grasshopper também é possível criar estruturas condicionais com o uso de componentes especiais. Outros componentes são capazes de subdividir formas, tais como linhas ou superfícies sem a necessidade de escrever a programação em texto. Alguns componentes são capazes de gerar números aleatórios ou sequências numéricas, tais como as séries de Fibonacci e a proporção áurea. Essas ferramentas podem ser utilizadas para implementar sistemas generativos de projeto.

## 1.6. 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. De acordo com o

paradigma generativo, Arquitetura é considerada como uma forma de vida artificial, propenso a, como o mundo natural, princípios de Morfogênese, codificação genética, replicação e seleção (FIAMMA, 2011).

Segundo Veloso (2010), não é incidental, nas últimas duas décadas, a extensa materialização de temas matemáticos e conceitos científicos em objetos arquitetônicos. A manipulação de geometrias fractais, sistemas de partículas, algoritmos genéticos, entre outros temas extra arquitetônicos propaga-se, em grande parte, pela produção pautada nos modelos digitais. Essa não é apenas uma conexão metafórica, mas, principalmente, operacional.

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, s.pg):

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 do auditório”.

## 1.7. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Os processos computacionais geralmente implementam primitivas geométricas que são posteriormente iterativas, repetidas, transformadas, informadas, deformadas e reformadas para produzir uma forma arquitetônica. Os dados que motivam essas transformações processuais do primitivo podem ser informados por uma ampla gama de critérios (estruturais, performativos, ecológicos, etc.). O vocabulário arquitetônico resultante é aquele que frequentemente registra essas agregações de primitivas (*morphing*, *transforming* e *accreting*). Aqui, o arquiteto não é mais o criador, por si só, mas o coreógrafo de processos que resultam em forma arquitetônica.

É cada vez mais requisitado que o profissional e estudante de arquitetura, utilize no processo de projeto diversos softwares em cada fase desse processo, ainda mais porque as informações contidas na produção da representação de um projeto também podem ser utilizadas se combinadas com outros softwares para avaliar as relações ambientais (orientação, perde e ganho de calor, critérios de conforto), uso de materiais (tipo e quantidade), estruturas ou mesmo conformidades legais (zoneamento, código de obras).

Dentro desse método de trabalho, surgem os conceitos de design generativo e de design paramétrico. O primeiro trata de formas de desenvolvimento de um produto (desenho, imagem ou forma) através de algoritmos, muitas vezes relacionados às teorias anteriormente citadas; o segundo, lida com o controle do produto, seja ele imagem, forma ou outro, através de parâmetros determinados que controlam e relativizam as partes do produto em um relacionamento dinâmico e complexo.

A partir das definições anteriores, percebemos que o design paramétrico engloba o design generativo conceitualmente, visto que este se utiliza de parâmetros para definir resultados. O fator que diferencia os dois conceitos é a abordagem ou a intenção do designer. Como o design generativo tem uma proposta exploratória que

busca por possibilidades inéditas e emergentes a fim de solucionar um problema, esse enfoque normalmente é utilizado em estágios iniciais do processo de design, já que o intuito nesses estágios é o de propor novas ideias e achar diferentes possibilidades.

Segundo Schumacher (2017), o “tectonismo” implica no aumento estilístico dos processos de busca e otimização de formulários baseados em engenharia e fabricação. No entanto, este estilo não significa um afastamento do parametricismo. Pelo contrário, o tectonismo é o estilo subsidiário atualmente mais prevalente e promissor dentro do paradigma abrangente dentro do estilo de parametricismo.

Embora a agenda abrangente de design geral permaneça como a busca de versatilidade e complexidade adaptativas pelo parametricismo, o tectonismo persegue esses conceitos com um conjunto muito mais rico de diretrizes e restrições paramétricas do que as versões anteriores do parametricismo. Essas diretrizes se originam de sofisticadas lógicas de engenharia computacionalmente capacitadas que agora estão disponíveis para arquitetos nos primeiros estágios de projeto através de ferramentas de busca de formulários analíticos e de performance (SCHUMACHER, 2017).

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 projeção 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-para-um” passa a integrar a tecnologia e a ferramenta desde o ato criativo. Daí o destaque na abordagem desse assunto ao longo deste trabalho: o fato de que a escolha do processo de produção da obra ressoa em sua própria concepção.



## **2. CAPÍTULO 2 – PROTOTIPAGEM E FABRICAÇÃO DIGITAL**

O presente capítulo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de técnicas de fabricação digital e realização de protótipos inserindo-as dentro de um contexto voltado para a construção de objetos arquitetônicos, com o princípio de identificar os principais instrumentos e funcionalidades específicos para determinado tipo de técnica utilizados e quais podem ser incorporados ao longo desta dissertação. Dessa forma, o capítulo aborda de que maneira a fabricação digital proporcionou a materialização de tectônicas digitais e paramétricas através da interação entre usuário e processo, e quais são as possibilidades de desenvolver novas maneiras de se produzir e projetar, realizando assim um enquadramento do design que transita entre os limites do físico e do digital, entre projeto e produção.

### **2.1. CAD E CAM E A RELAÇÃO COM A ARQUITETURA**

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).

De acordo com Stabile (2015), a fabricação digital começou a ganhar espaço nos anos 90, muito por conta da queda de uma das patentes de impressão 3D, porém naquele momento apenas profissionais das áreas de produção, engenharia e computação é que possuíam o domínio adequado da técnica para empregar esse tipo de impressão e outros meios de fabricação digital em seus projetos. Foi apenas nos anos 2000 que houve uma conscientização do potencial da fabricação digital para o design e a arquitetura. Ainda no início da década de 2000, seu uso era restrito à prototipagem, e os materiais passíveis de serem impressos tridimensionalmente eram muito limitados.

Para Stabile (2015) outro fator que contribuiu para essa conscientização foi a aproximação dos profissionais do design e da arquitetura com a programação. Afinal, foi nesse período que alguns designers passaram a assumir também o papel de programadores *Web* motivados pela expansão da internet e a necessidade de divulgação online e elaboração de sites. Além disso, a utilização de novos *softwares* paramétricos permitiu que dominassem a lógica de programação.

Já a partir do fim dos anos 2000, 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). 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.

Um programa CAD é uma tecnologia computadorizada com foco no desenho do produto e na documentação da fase de projeto, durante o processo de engenharia. O CAD pode facilitar o processo de manufatura, transferindo diagramas detalhados dos materiais utilizados nos produtos, processos, tolerâncias e dimensionamentos. Disponível em: <https://goo.gl/YZixgh>.

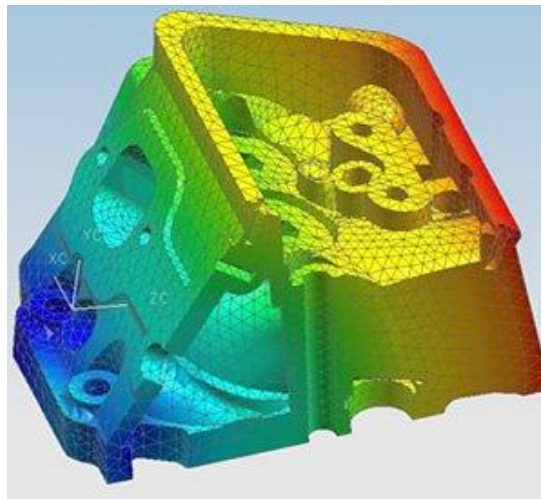
A maioria dos programas CAD mostra a aparência geral dos objetos desenhados e a criação de formas diversas. No entanto, *softwares* de engenharia exigem mais do formas, eles devem transmitir informações, tais como – materiais, processos, dimensões e tolerâncias, de acordo com as convenções específicas para cada aplicação. Disponível em: <https://goo.gl/rsRi9z>.

Além de ser uma das muitas ferramentas utilizadas por engenheiros e projetistas, com aplicações diversas também em variadas profissões, o CAD é uma parte de toda a atividade Digital de Desenvolvimento de Produto, dentro do processo de Product Lifecycle Management (PLM). São utilizados de forma integrada com outras ferramentas, que podem ser módulos integrados ou produtos autônomos, tais como:

1. Engenharia Assistida por Computador (CAE)
2. Manufatura Assistida por Computador (CAM)
3. Renderização
4. Gestão de Documentos e Controle de Revisão

CAE (*Computer-Aided Engineering*) É o uso de programas de computador para auxiliar nas tarefas de análise de engenharia. O termo inclui simulação, validação e otimização de produtos através de processos como: a análise de elementos finitos, dinâmica computacional de fluidos, dinâmica de multicorpos e otimização. Sistemas CAE tem sido uma grande fonte provedora de informação para ajudar as equipes de projeto nas tomadas de decisões. Disponível em: <https://goo.gl/rsRi9z>.

Figura 11 – CAE (*Computer Aided Engineering*), Malha de nós.



Disponível em: <https://goo.gl/rsRi9z>. Acesso em: 18/08/2018.

O CAM (*Computer-Aided Manufacturing*), pode ser traduzido como “manufatura assistida por computador”, consiste no uso de um software para controlar

ferramentas de máquinas e equipamentos relacionado ao processo de fabricação. Disponível em: <https://goo.gl/rsRi9z>.

Aplicativos CAD/CAM são utilizados para projetar um produto e programar processos de manufatura, especificamente usinagem CNC. O software CAM usa os modelos e as montagens criadas no software CAD para gerar caminhos de ferramentas que controlam as máquinas responsáveis por converter os projetos em peças físicas. Não é tecnicamente considerado um sistema de programas de software de engenharia, mas sim voltado para as máquinas na fabricação. CAM também pode referir-se a utilização de um computador para ajudar em todas as operações de uma plano de fabricação, incluindo planejamento, gestão, transporte e armazenamento. Seu objetivo principal é criar um processo mais rápido de produção e componentes e ferramentas com dimensões mais precisas e consistência material. Antes deste tipo software, o operador tinha de digitar manualmente o código antes de implementar o programa e essa entrada manual pode ser trabalhosa, com base na complexidade do produto final. Disponível em: <https://goo.gl/rsRi9z>.

Tudo o que seria necessário ser feito por um operador com máquinas convencionais é programável com máquinas CNC.

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).

Potencializado pelo advento do design computacional que motivam essas transformações processuais e podem ser informados por uma ampla gama de critérios (estruturais, performativos, ecológicos, etc.). O design “um-para-um” passa a integrar a tecnologia e a ferramenta desde o ato criativo: a escolha do processo de produção da obra ressoa em sua própria concepção. Em contrapartida, quanto mais digital o processo se torna, menos intuitivo ele se apresenta, sendo necessário o conhecimento claro das informações.

O momento da difusão e do barateamento das técnicas de fabricação digital é definido por alguns autores, entre eles Kolarevic, como o momento da “Quarta Revolução Industrial”, com uma conseqüente mudança nos paradigmas industriais, na produção seriada em larga escala (característicos da Segunda Revolução Industrial), e na “*mass customization*” (KOLAREVIC, 2000), ou seja, a produção em larga escala de objetos únicos e diferentes entre si.

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).

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).

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 2009), 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.

As mesmas técnicas de prototipagem rápida podem ser usadas para a fabricação de ferramentas e peças, um processo também conhecido como ferramentaria rápida, ou seja, a fabricação automática de ferramentas para uso na produção em série. De fato, a prototipagem rápida é o melhor processo de manufatura possível quando se precisa produzir pequenos lotes de peças e ou no caso de componentes complicados.

Além disso, enquanto a industrialização introduz uma eficiência que depende necessariamente da repetição entre montagem e fabricação, o desenvolvimento de processos de fabricação através de design computacional, traz a mesma eficiência com diferentes elementos, onde a padronização não se faz necessária para que haja economia e otimização de materiais.

Estima-se que a economias de tempo e de custos proporcionada pela aplicação das técnicas de prototipagem rápida na construção de modelos sejam da ordem de 70 a 90%. Disponível em: <https://goo.gl/HtdAg6>.

Ainda assim o termo "rápido" associado a esses processos é relativo. A construção de alguns protótipos pode levar de poucas horas ou mesmo a dias, dependendo do tamanho e complexidade do objeto. Ainda assim esses processos são bem mais rápidos que os métodos tradicionais, tais como usinagem, que podem requerer dias ou mesmo meses para fabricar um único protótipo.

A fusão dessas tecnologias e a interação com as dimensões física, digital e biológica que tornam o fenômeno atual diferente de todos os anteriores. Tecnologias emergentes e inovação em ampla escala têm se difundido mais rapidamente e de maneira mais ampla do que em movimentos do passado.

## 2.2. TIPOS DE FABRICAÇÃO DIGITAL

A introdução de computadores em design e fabricação tem fornecido aos arquitetos um conjunto aparentemente inesgotável de novas formas. Tal como a integração do século dezenove de máquinas industriais nas “*arts and crafts*” – o uso máquinas CNC atualmente permite novas possibilidades de produção. Mas se o valor desta maquinaria industrial era repetir o mesmo padrão indefinidamente, o valor da produção digital é a variação das formas e possibilidades ajustam de acordo com a necessidade de cada usuário e ocasião. De acordo com algoritmos ou outros dados de entrada.

Os métodos de prototipagem (*prototyping*) são destinados à produção de protótipos ou modelos de avaliação e utilizados durante a concepção do projeto e auxiliam na avaliação das alternativas geradas. Quando esses produtos (ou elementos construtivos) são utilizados diretamente na construção, referem-se ao sistema de fabricação (*fabrication*) ou manufatura (*manufacturing*) (Celani, Pupo, 2008). Sobre os novos métodos aplicados à arquitetura, Mitchell defende: “Se os arquitetos pretendem escapar à lógica Modernista da padronização e da repetição, então, necessitam combinar várias estratégias. Em primeiro lugar, têm de aprender a projetar num “metanível” – o de sistemas de regras que especificam grandes famílias de possibilidades de projeto, mais do que projetos específicos.” (Mitchell, 2007).



Segundo Branko Kolarevic (2001), existem quatro formas básicas de fabricação digital por meio de CNC – Controle Numérico Computadorizado. São elas: corte, subtrativas, aditivas e formativas.

O corte CNC é uma técnica de fabricação bidimensional e a mais amplamente utilizada na fabricação digital. Abrange tecnologias de corte a laser, plasma ou jatos de água. As máquinas de corte a laser são amplamente utilizadas, principalmente pela facilidade de se entender o método de fabricação, esse por subtração. A máquina usa um raio laser para cortar com precisão diferentes tipos de materiais. Também pode fazer gravura superficial, controlando a potência e a intensidade do laser. Esta técnica só pode fazer formas 2D, mas pode-se facilmente entender como o corte será feito, pois o resultado será muito próximo das linhas ou desenhos criados.

As tecnologias subtrativas, como o próprio nome sugere, implicam na remoção de material de peças sólidas por fresagem. As máquinas de fresagem atuam sob o método de subtração e podem ter de 3 a 6 eixos de operação. Os mais comuns têm 3 eixos de movimento (X, Y, Z), que permitem processos simples em 2D ou modelagem 3D, subtraindo material de um bloco maciço, usando “moinhos” que podem ter um número infinito de geometrias e tamanhos (de moinhos de estreito, para bits mais elaborados). De todas as três técnicas, esta é a mais versátil, permitindo processar tipos de materiais muito diferentes e ser capaz de fazer objetos 2D ou 3D de tamanhos pequenos ou grandes.

Os processos aditivos, também conhecidos como impressão 3D, podem ser realizados de diversas maneiras, mas todas elas consistem basicamente na adição de material, camada por camada, até a formação do objeto desejado. A impressão em 3D é uma técnica de adição que cresce cada vez mais no mundo devido à sua facilidade de uso e bastante barata (máquinas e impressão). Existem diferentes tipos de técnicas de impressão em 3D, mas a mais comum é a extrusão de plástico. Isso aquece e derrete o plástico (principalmente PLA e ABS) e deposita-o no local exato. O modelo 3D é feito por camadas consecutivas de plástico aquecido que esfriam e se solidificam quase que instantaneamente, permitindo fazer quase qualquer tipo de modelo tridimensional dentro das dimensões da impressora.

Por fim, os processos formativos dizem respeito à deformação de materiais. Por meio de processo mecânicos, calor e vapor, entre outros, é possível ter controle total da deformação de várias peças, que podem ser encaixadas entre si ou ainda ser deformadas especificamente para o encaixe em alguma estrutura existente (KOLAREVIC, 2001).

### 2.3. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DIGITAL

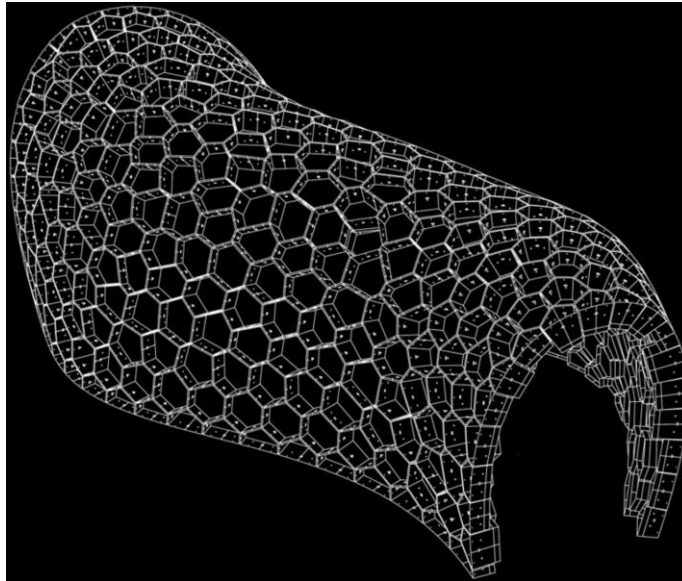
Todas essas técnicas foram amplamente empregadas no design e na arquitetura que deram subsídios para a criação de novos processos de projeto de design associados ao método de produção. Segundo Iwamoto (2008), ela elenca outros processos de projeto para a fabricação como: *sectioning*, *tesselation*, *folding*, *contouring* e *forming*.

É possível entender *sectioning* (Seccionamento) e *contouring* (contorno) como evoluções das projeções planimétricas - método tradicional de projeto - como nos processos tradicionais de construção, e serve para a comunicação com o construtor, só que neste caso o construtor é uma máquina. Seus comandos designam cortes paralelos ao longo de um eixo determinado e também em intervalo de espaço determinado.

As estruturas que estão definidas aqui como *waffle*, são constituídas por peças Inter travadas ortogonalmente, e que são abordadas como seccionamento por Lisa Iwamoto (2009). *Tesselation* (tesselação) trata-se de um grupo de peças unidas resultando em uma forma única, sem espaço entre elas, para formar um plano ou superfície. Os padrões de Escher são frequentemente citados como exemplos da técnica de tesselação.

Existem duas formas primárias de modelagem de objetos tridimensionais digitais, levando em consideração a tesselação: NURBS e *meshes* (malhas, tramas). Esse tipo de fabricação digital testemunha o crescimento da noção de superfície como um conjunto de peças, e não como uma coisa só, e leva em consideração os materiais e métodos de fabricação.

Figura 12 -Tesselação Celular – por Abedian School of Architecture.



Disponível em: <https://goo.gl/UV7Rc1>. Acesso em: 18/08/2018.

O *folding* (dobra) transforma uma superfície plana em tridimensional. E quando um material é dobrado, pode ganhar rigidez e força, passando a ser autoportante, na maioria das vezes.

Podemos citar como referência engenheiros do século XX que contribuíram com experimentações estruturais e arquitetônicas usando a dobra. Tais como, segundo Iwamoto (2009): Félix Candela, Eduardo Catalano, Pier Luigi Nervi e Eduardo Torroja.

Tais experimentações, concebidas com o pensamento da dobra, muitas vezes apresentavam um único elemento constituinte de paredes e teto, resultando em uma forma estruturalmente muito eficaz e econômica por empregar um único elemento com alta performance.

Ao longo dessas discussões já estava presente o conhecimento de que diferentes geometrias exercem também diferentes papéis estruturais.

Com a técnicas de *contouring* (contorno) Iwamoto (2009) quer dizer que a produção de objetos tridimensionais com peças de aspecto bidimensional por meio de métodos de fabricação subtrativos, podendo ser processos de fabricação digital. Segundo a autora, o *contouring* por processos digitais é uma maneira de reviver o entalhe realizado artesanalmente.

*Forming* (formação) diz respeito a elementos moldados, que na arquitetura tiveram seu ápice nos anos 50 e 60 como elementos de fachada. Esse tipo de fabricação é geralmente empregado na produção industrial, ou seja, quando se pretende produzir um grande número de peças com um pequeno número de moldes. A fabricação digital não permite apenas utilizar-se de elementos moldados, bem como customizá-los, através de ferramentas digitais.

Como conclui Michael Speaks (2002), o fazer tornou-se conhecimento ou criação de inteligência. Os limiares entre os atos de pensar e fazer, design e fabricação, protótipo e projeto final tornam-se difusos e não sequenciais.

### 3. CAPÍTULO 3 – CASOS DE ESTUDO

A observação do mundo que nos circunda é uma atitude natural e constante do ser humano para obter informações sobre as necessidades e curiosidades presentes obtidas por essa observação.

Dencker e Da Viá (2008) afirmam que ademais de ser uma atividade natural do indivíduo que não depende de método (p.144), a ciência se inicia por essa observação (p.145), a qual ao longo do desenvolvimento do pensamento científico, vai ganhando forma e se valendo como importante fonte de levantamento de dados para as análises que se seguirão em cada reflexão proposta na academia.

O conceito de “caso de estudo” que foi utilizado neste presente trabalho, de acordo com Roesch e Fernandes (2007) possui como características a reconstrução de situações problemáticas gerenciais ou organizacionais para fins didático-educacionais. Tais situações são específicas à dada organização e partem do ponto de vista do observador, ou seja, de quem escreveu tal situação problema como um caso para estudo. Esses casos são descritos com base nos elementos que formam o seu contexto e principalmente nos antecedentes históricos do problema detectado. Ainda segundo Roesch e Fernandes (2007) podemos elencar como principais características de um Caso de Estudo:

- \* Tratam de tópicos relevantes para a área;
- \* Proporcionam uma viagem de descoberta que permite separar sintomas de problemas mais fundamentais;
- \* Podem levantar controvérsias, proporcionando diferentes interpretações, decisões e planos de ação;
- \* Contém contrastes e comparações;
- \* Permitem aos participantes generalizar lições e conceitos subjacentes no caso para outras situações;
- \* Contém dados apropriados (nem de mais, nem de menos) para tratamento dos problemas: descrição do caso, dados quantitativos, resumo do método.

\* Possuem um toque pessoal: incluem a fala dos participantes e a descrição de processos organizacionais

\* São bem estruturados e bem relatados;

\* São curtos.

Roesch e Fernandes (2007) apresentam diferenças conceituais entre casos para estudo e estudo de caso, quanto ao seu tamanho, seus objetivos, seu público-alvo, a coleta de dados que o precede, quanto a estrutura do texto e sua redação, como apresentados no quadro referência abaixo:

Quadro de Referência das diferenças entre Casos de Estudo e Estudos de Caso.

	<b>Casos para estudo</b>	<b>Estudos de Caso</b>
<b>Tamanho</b>	- Máximo de 8 a 10 páginas de texto, espaço 1, e até cinco páginas de anexo.	- Geralmente acima de 30 páginas, espaço 1.
<b>Objetivos</b>	- Informar sobre o contexto gerencial e organizacional. - Ilustrar aulas expositivas - Desenvolver habilidades gerenciais. - Contribuir com repertório de conteúdo e exploração de métodos acadêmicos e práticos.	(Objetivos de pesquisa explícitos no texto). - Descrever ou explorar situações. - Ilustrar ou desenvolver teorias. - Testar hipóteses.
<b>Coleta de dados</b>	- Planos de ensino. - Coleta específica a uma organização, de fatos, opiniões, números, documentos, dados publicados, cenários, episódios, gestos, falas. - Revisão bibliográfica	- Revisão Bibliográfica. - Coleta ampla em uma ou mais organizações, de fatos, opiniões, números, documentos, dados publicados.
<b>Estrutura do texto</b>	- Sanduíche ou na forma de uma história. - Descrição resumida do método e da	- Analítico-linear, ensaio, ordem cronológica ou por itens.
<b>Redação</b>	- Narração da situação-problema do ponto de vista de um ou mais personagens do caso. - Descrição, sumário cronológico de eventos, uso de cenas e diálogos.	- Narração por um observador independente. - Descrição, análise dos dados, críticas, sugestões. - Interpretação, tendo em vista conceitos ou teorias.

Adaptado de: (ROESCH E FERNANDES, 2007, p.31).

Os projetos aqui apresentados são escolhidos dentro de uma abordagem que relaciona as áreas tratadas neste trabalho: design computacional e fabricação digital. Esses estudos visam a contribuir de alguma forma com novas perspectivas sobre o design e sobre os temas e questões abordadas durante o trabalho. Esses casos servem não apenas como repertório para a realização do projeto piloto desta pesquisa, mas também para demonstrar as diversas possibilidades de interpretação do processo. Quando tratamos de prática em design, está sempre associada a realização de ideias e conceitos até a produção, e quando falamos em processo de design, vincula-se às metodologias práticas e os processos necessários para a realização daquela produção. Esta seção apresenta exemplos de projetos que possam trazer alguma contribuição na compreensão da aplicação atual das teorias e conceitos que foram introduzidos até aqui, que descrevam e relatem o processo de *design*, produção e montagem destes projetos.

Da discussão anterior sobre o termo tectônica, são suscitadas questões centrais a serem escolhidas como critério: material, construção e lógica estrutural. Ressalta-se também que o termo “tectônica digital” não foi dividido em qualquer subcategoria de análise. Como o termo tectônica digital em si é relativamente novo, não existem teorias suficientemente estabelecidas e elaboradas sobre o assunto, como existem para a tectônica tradicional. Portanto, algumas palavras-chave gerais sobre a questão da tectônica digital são escolhidas a partir das teorias tratadas anteriormente.

O que todos esses casos têm em comum é um uso heurístico de sistemas digitais, como forma de incorporar uma coerência projetual em busca de novas e mais expressões tectônicas (espaciais-estruturais ou metodológicas).

Optou-se por casos de estudo que apresentam diferentes exemplos de processos de design e que envolvem recursos computacionais. Procurou-se ainda, por exemplos nos quais o processo metodológico estivesse explícito, já que o cerne do trabalho é reforçar o argumento de como o processo influencia diretamente no resultado final.

### **3.1. PAVILHÃO TETRA SCRIPT**

O pavilhão tetra script tem como partido “o desenvolvimento de um sistema integrado para otimizar a iluminação natural dentro de um espaço circunscrito”

(HENRIQUES, 2009, pág 107). O modelo desenvolvido por Gonçalo Castro Henriques com orientação de José Pinto Duarte e Joaquim Oliveira Fonseca da Faculdade de Arquitetura de Lisboa, relaciona-se com os campos de interesse que tratam da otimização ambiental em projetos, fabricação em série personalizada e com controle e automação, viabilizando assim a construção da ideia do pavilhão.

A palavra TetraScript é formada pela junção do termo “*Tetra*” que faz alusão à um agrupamento de quatro elementos, enquanto a palavra “*Script*” refere-se a escrita de um algoritmo. Em relação a palavra Tetra, ela segue, segundo Henriques (2013) da intenção de se controlar as quatro faces de um componente que compõem a forma de uma pirâmide, formando a geometria do pavilhão e controla a entrada de luz no interior desse espaço.

Figura 13 - Pavilhão Tetra Script – Projeto de Gonçalo Castro Henriques

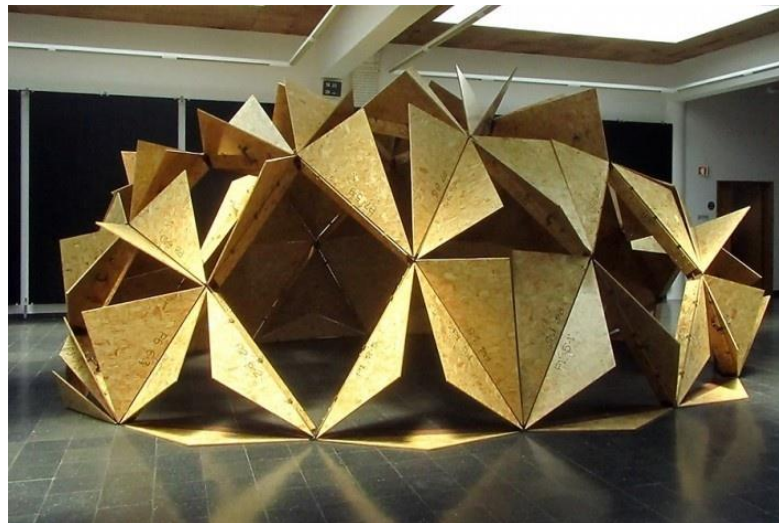


Foto de Gabriela Celani: disponível em:

<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquiteturismo/07.082/5002>. Acesso em:  
18/08/2018.

A metodologia de trabalho perpassa sobre as seguintes etapas únicas mas integradas dentro do processo de projeto:

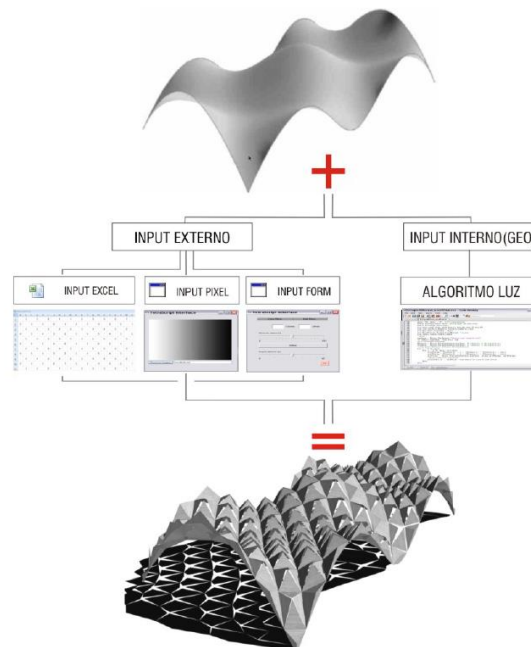
- A) Desenvolvimento do projeto que gere soluções adequadas à localização geográfica com o uso de programação (*scripting*),



- B) O desenvolvimento de um sistema que proporcionasse a produção para materializar a fabricação com uso de tecnologias CAD/CAM;
- C) E por fim o uso de sistemas de controle automático nas aberturas, com tecnologias de automação para controle da luz que penetra no interior da estrutura.

Em um primeiro momento do desenvolvimento do projeto, foi elaborado um algoritmo em *Visual Basic*, para dividir a superfície curva geradora, que dá origem a claraboias individuais que se abrem controlando a iluminação interior. Segundo Henriques (2009) cada uma das claraboias geradas tem a forma de pirâmide, com quatro faces triangulares que para serem abertas rotacionam sobre a aresta da base. O uso da programação paramétrica permitiu que fossem testadas diferentes variações das claraboias em diferentes superfícies. Foram utilizadas várias interfaces para a definição do valor das aberturas, desde a importação dos dados de uma folha de Excel para o software Rhinoceros, até a obtenção de valores a partir de bitmaps, e por fim a solução usada com um algoritmo capaz de relacionar a luz (fatores globais) com a inclinação da superfície (fatores locais).

Figura 14 - Processo para obtenção da forma do Pavilhão TetraScript.



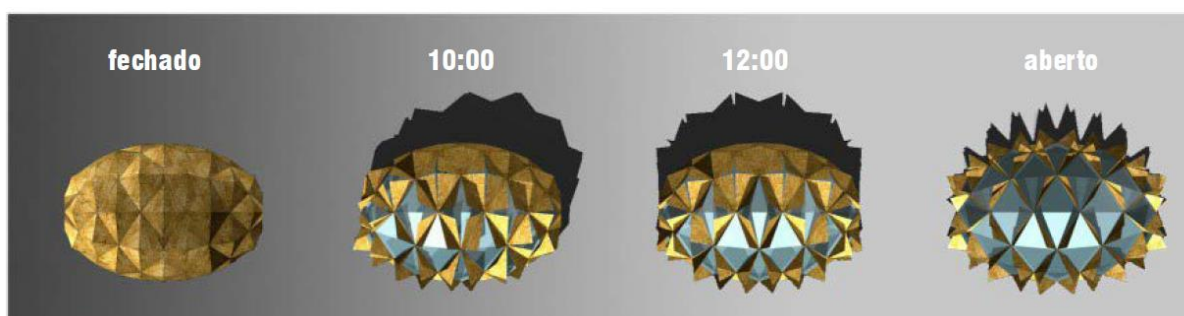
Fonte: Henriques (2013).

O pavilhão Tetra Script foi projetado então com dimensões aproximadas de 6x4x3 metros, em forma de cúpula, de maneira a testar a incidência da iluminação interior de acordo com a hora do dia e a localização, visando a sua otimização. Essa otimização age de acordo com as restrições geográficas e dimensionais, e procurou então maximizar a capacidade da superfície para receber luz natural.

Em um segundo momento foram levadas em consideração aspectos físicos, como a escala e o tipo de material a ser utilizado, para que a forma pudesse ser otimizada afim de responder as limitações de fabricação e de estrutura.

No último momento do processo de concepção e programação da forma pretendida, um sistema inteligente de controle das aberturas foi elaborado. Segundo Henriques (2009), com o uso do algoritmo criado no primeiro momento, é possível através da definição da localização da fonte de luz, conseguir valores para o grau de abertura das clarabóias para o local e a hora pretendidos. Ao combinar essas informações com valores medidos por sensores, é possível implementar um sistema responsivo, transmitindo dados a um computador que através de uma interface programável gera as variações de posição e intensidade de fonte de luz natural de modo a informar localmente os atuadores.

Figura 15 - Conceito do Pavilhão TetraScript reagindo à luz solar.

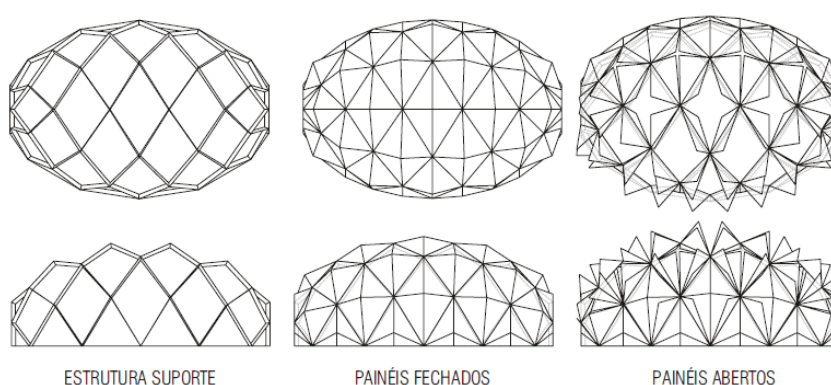


Fonte: Henriques (2013).

Ainda segundo Henriques (2009), o uso de determinadas geometrias é influenciado diretamente pela tecnologia disponível para a sua construção. No pavilhão TetraScript a capacidade de captação de luz e as alternativas de fabricação e construção antecederam-se a otimização estrutural, ao contrário da ordem mais comum da construção tradicional. O principal objetivo do partido da forma foi construir uma

estrutura que fosse leve e do tipo alveolar e materializar essa forma pretendida através de um princípio geométrico. A superfícies de base esferóide foram divididas em alvéolos correspondentes às claraboias, sendo criado um conjunto de pontos que correspondessem aos encontros com estes alvéolos e criado em cada um deles um vetor normal com comprimento constante correspondente à altura dos alvéolos, mas que resultasse em diferentes inclinações. Com isso foi possível estabelecer ligação da mesma família, que pudessem ser planificadas para fechar geometricamente a estrutura.

Figura 16 - Pavilhão Tetra Script – Estrutura Suporte, Painéis fechados e abertos.



Fonte: Henriques (2013).

A estrutura final do pavilhão construído possui 42 nós, 82 barras e 140 palacas de revestimento com formas triangulares de dimensões variáveis formando a cobertura. Os materiais utilizados foram realizados através de ligações de aço e madeira, dos quais as vigas de madeira são ligadas por chapas de aço e fixadas posteriormente com ligações metálicas.

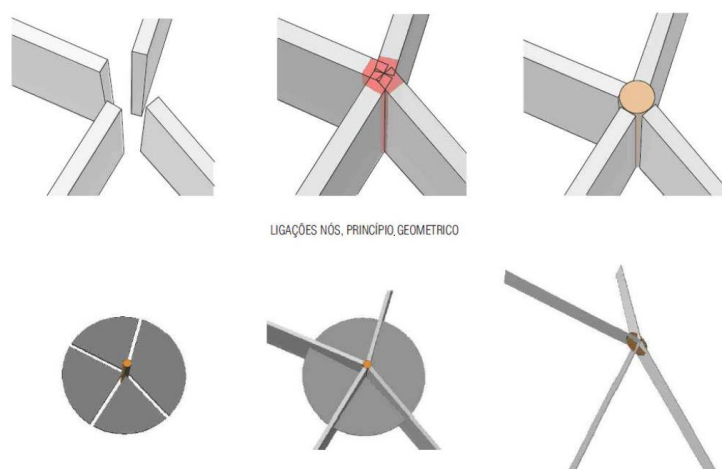
Uma vez definidas as dimensões máximas do protótipo (6x4x3 m) em função do espaço disponível na exposição, utilizou-se um processo iterativo seletivo para encontrar a superfície esferoide de base e alçado elípticos com maior área por volume e a melhor divisão e orientação das entradas de luz. A estrutura de suporte tem como base nós normais à superfície.

Segundo Henriques (2009) a estrutura do pavilhão está em termos materiais, mais relacionada com as formas geodésicas desenvolvidas por Buckminster Fuller. No entanto Henriques (2009) ressalta que nas coberturas geodésicas existe um

procedimento matemático para a racionalização da estrutura, que resulta na padronização de elementos e nós de ligação. No caso da estrutura TetraScript não teve como ponto de partida um sólido platônico, e também não a otimização estrutural e normalização dos componentes, o ponto de partida, como citado anteriormente segundo o autor foi a otimização da entrada de luz e da superfície base, que obrigou a uma definição geométrica local, topológica e não genérica, fazendo com que houvesse uma geometria associativa para cada ponto.

O material base utilizado foi um derivado de madeira, aglomerado de partículas longas e orientadas (OSB), por sua fácil tratabilidade e corte, muito indicado para estruturas customizadas, que possuem uma boa relação entre densidade e resistência além do custo baixo, apesar de possuir um comportamento estrutural pouco conhecido. Isto exigiu do arquiteto projetista Gonçalo Henriques a sistematização das características físicas do material, como a densidade, tensão de ruptura, módulo Young, etc.

Figura 17 - Geometria dos nós de ligação metálicos do pavilhão.

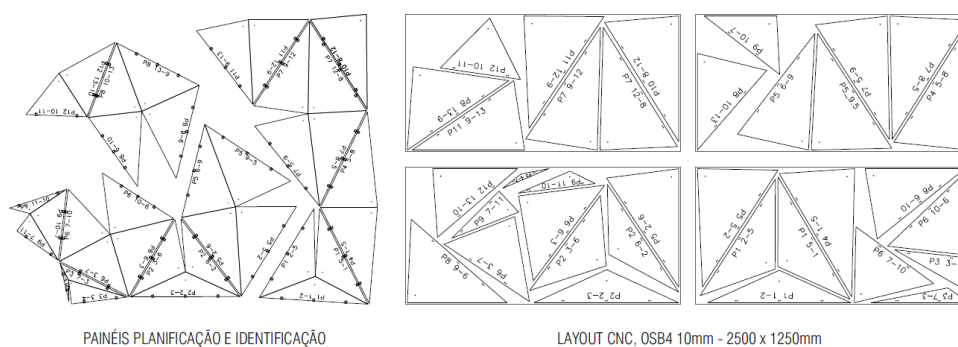


Fonte: Henriques (2013).

O processo de montagem do pavilhão começou com a decomposição do modelo em vários subconjuntos de componentes, com o uso de fundamentos de racionalização para que fossem evitados um número muito alto e desnecessário de elementos. Feito isso, foi realizada uma definição algorítmica que planificasse os elementos para o corte CNC. Em um primeiro momento, houve a fabricação e o corte das barras e painéis em OSB para que depois recebessem um acabamento final.

Segundo Henriques (2009) as máquinas que estavam disponíveis no momento de construção do pavilhão para a fabricação dos nós metálicos possuem dimensões pequenas e softwares defasados. Estas restrições fizeram com que as chapas fossem cortadas em uma guilhotina industrial e fosse necessário o desenvolvimento de um programa para prepara os arquivos no formato DXF para ISO em cada uma das máquinas disponíveis. Sendo assim, o corte dos contornos, furos e numeração de cada peça foram feitos em diferentes máquinas separadamente. Isso resultou em um processo mais lento, com um número muito maior de operações e facilitaria a manipulação dos componentes para a montagem final. Os nós então foram finalmente unificados por soldura de precisão de eletrodo-tungstênio (TIG, soldadura tungstênio inerte com gás).

Figura 18 - Planificação dos painéis e layout para corte CNC.



Fonte: Henriques (2013).

Para averiguação da análise estrutura do pavilhão por possuir uma geometria mais complexa, foi necessário que se utilizasse um programa de cálculo o SAP2000 com interface gráfica que importasse a geometria do modelo para as análises, considerando as seções de OSB de 12 e 18mm. Para a análise a estrutura levou em consideração um conjunto de arcos tridimensionais, dos quais foi desprezada a resistência da cobertura e seu papel de casca, pelo fato dela estar sempre aberta e não poder ser considerada como tal.

Segundo Henriques (2009), foram consideradas as seguintes ações: cargas permanentes (peso próprio das barras, placas de revestimento e ferragens, 600 kg) e cargas variáveis (sobrecarga utilização 0,3 kN/m<sup>2</sup>), considerando a cobertura acessível para trabalhos de manutenção. O sistema automatizado de abertura dos módulos da clarabóia, utilizam de 4 atuadores lineares.

Figura 19 - Montagem do Pavilhão Tetra Script



Fonte: Henriques (2013).

Como conclusão sobre o estudo de caso do pavilhão TetraScript de Gonçalo Henriques, e suas relações com as tectônicas digitais até aqui apresentadas faz-se a seguinte citação:

As ferramentas digitais podem libertar-nos das restrições das formas platônicas e ideais, permitindo explorar outras geometrias baseadas em relações topológicas. Simultaneamente podem permitir a complementaridade entre geometria e materiais em vez de excluir este diálogo, relacionando a realidade virtual e material. Nesta perspectiva o espaço criativo digital e físico podem expandir-se como tecnologia ao nosso dispor. Esta visão e a experimentação, num processo de tentativa e erro, assumidamente prático, foram fundamentais para conseguir materializar com sucesso o pavilhão TetraScript. (HENRIQUES, 2009)

### 3.2. SAMBA RECEPTION DESK

Este objeto de estudo foi um projeto experimento resultado de uma dissertação de mestrado, desenvolvido por Wilson Barbosa Neto e orientado por Gabriela Celani na Museu Exploratório de Ciências da Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP. O objetivo central da dissertação era a descrição de uma experiência que compatibilizasse questões de diversos âmbitos como: estética, leveza, fabricação, montagem e desempenho estrutural durante o processo de projeto, e que durante o método integrasse diferentes tipos de modelos físicos e virtuais para análise e seleção de critérios ao longo das várias fases do processo para que melhor atendessem a demanda pretendida do produto final.

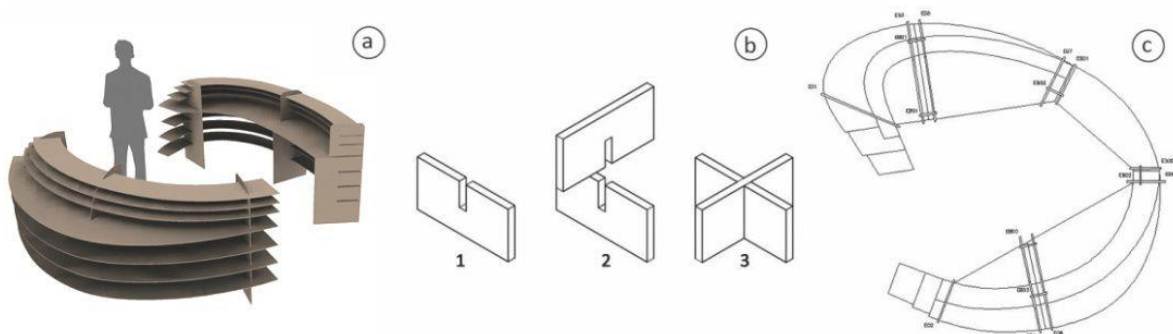


Trata-se de um balcão de recepção que contou com a colaboração de alunos dos cursos de Engenharia Civil e Arquitetura de graduação e pós-graduação da referida instituição. A análise desse caso de estudo vai de encontro ao método aqui proposto, servindo como uma referência para a coleta de informações e etapas de projeto e pesquisa, reconhecendo quais foram as estratégias utilizadas para a solução dos problemas neste projeto, auxiliando na própria proposta metodológica e sequenciamento das etapas envolvidas a serem desenvolvidas por esta dissertação.

O projeto da Samba Reception Desk envolve três aspectos de design e fabricação dentro do processo. O primeiro deles é o design paramétrico usado não apenas como maneira de se alcançar a forma final do objeto, mas também como interação constante entre as partes e conexões. O segundo é o de integrar o uso de modelos virtuais e físicos durante o processo de design e análise estrutural, e por último levanta questões de fabricação e as relações com o processo de design como um todo.

O partido inicial do desenvolvimento do conceito do Balcão Samba era a necessidade do Museu em contar com um mobiliário que fosse adaptável a diferentes layouts, que também fosse leve e fácil para montagem e deslocamento, adequando-se as necessidades de cada exposição. Os estudantes de arquitetura propuseram então uma mesa curva de três partes a serem construídas com corte CNC, e estruturado por juntas no estilo “caixa-de-ovo”.

Figura 20 – Desenvolvimento do conceito (a) – Modelo 3D (b) – Componentes do balcão (c) – Planta baixa inicial.

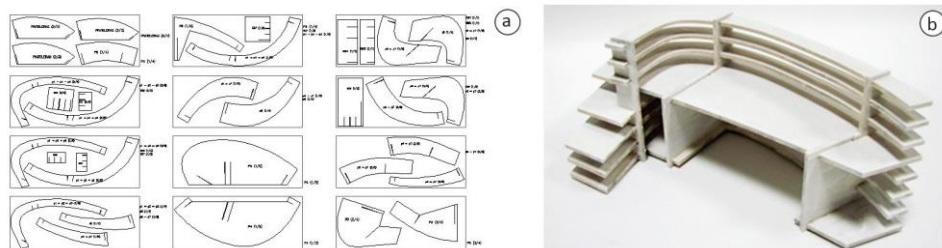


Fonte: Neto et al. (2014)

Os estudantes produziram então desenhos técnicos 2D usando *softwares* de CAD padrão e fizeram um modelo em escala 1:20 de MDF com corte a laser para verificar as juntas e a estabilidade da mesa.

O primeiro problema encontrado foi o fato de que os desenhos de produção apresentaram inconsistências em muitos aspectos, tais como correspondência de entalhe, continuidade de curvas e problemas de estabilidade. Além disso, a largura dos entalhes não pôde ser atualizada automaticamente para adaptar o projeto a diferentes larguras de materiais. Os modelos físicos mostraram que a estrutura seria muito estável, mas a montagem da mesa seria difícil por causa da rigidez da madeira compensada. A possibilidade de usar um material de folha mais flexível, como placa de aço, foi então considerada. Neste ponto, a equipe percebeu que o desenvolvimento desse projeto exigia uma abordagem interdisciplinar para resolver corretamente problemas de fabricação e estruturais. Sendo assim, este exercício de design tornou-se um projeto mais complexo, envolvendo uma equipe de pesquisadores do Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção (LAPAC), abrindo caminho para a utilização de um modelo paramétrico para a realização do projeto.

Figura 21 – Projeto inicial do balcão. (a) – Plano de corte em 2D; (b) – Modelo físico em MDF.



Fonte: Neto et al. (2014)

A partir do momento que inicia-se a abordagem multidisciplinar, todo o processo teve de ser revisto, já que agora o projeto do balcão seria desenvolvido a partir de um modelo paramétrico. Além de obviamente o uso de softwares paramétricos dentro da esfera virtual do projeto, tendo o software Rhinoceros como base e seus plug-ins: Grasshopper para obtenção da forma através de geometria associativa, *Rhino Nest* para otimização da área de corte e economia de material e *Scan and Solve* para análise de esforços e flexões das peças, outros recursos foram introduzidos como a prototipagem rápida 3D branca e colorida, e máquinas industriais de corte a laser e corte a plasma.



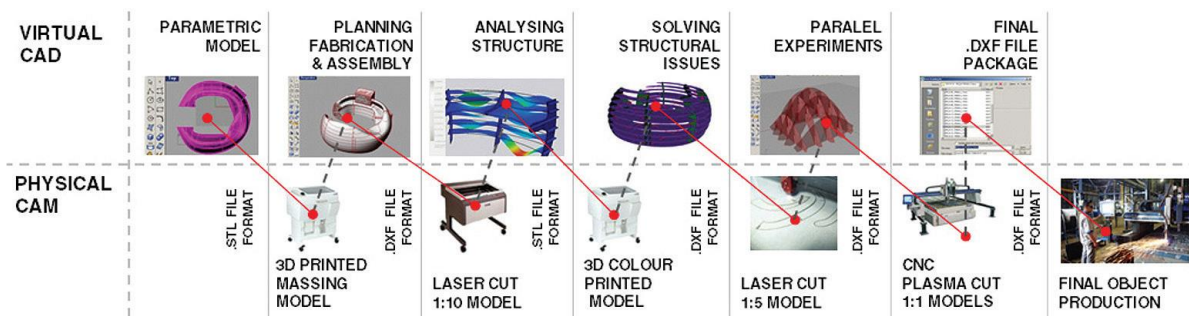
Figura 22 – (a) Impressora Zcorp 3D. (b) Sistema de corte a laser universal. (c) Cortadora a plasma CNC multi térmica.



Fonte: Neto et al. (2014)

Essas técnicas introduziram assim uma nova demanda dentro dos objetivos do projeto, o de não somente atender as necessidades de partido e função do objeto, mas também o de exercer a otimização da produção automatizada.

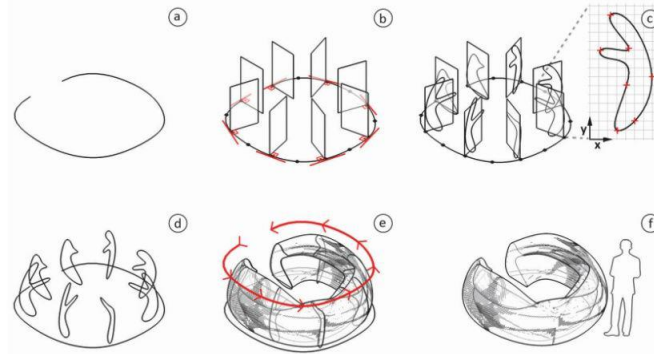
Figura 23 – Etapas físicas e virtuais do processo.



Fonte: Neto et al. (2014)

O desenvolvimento de um novo conceito para o projeto, agora baseado no modelo paramétrico, levou a equipe a pensar em uma nova disposição geométrica, porém, uma forma que mantivesse os critérios estéticos e ergonômicos inicialmente pensados. Com a utilização de um plano de projeto generativo, que baseia-se na criação de regras e informações parametrizadas, foi possível a geração de um grande número de soluções para o projeto do balcão. Os processo internos realizados dentro do software de modelagem seguiram os seguinte passos: criação de uma curva principal no plano base; divisão dessa curva em oito segmentos iguais; em que cada um dos pontos recebeu um plano vertical e perpendicular a curva principal, com um outro conjunto de pontos que podem ser controlados de maneira individual através de coordenadas (X,Y); posteriormente cada um desses conjuntos de pontos foi ligado por uma curva do tipo spline; e para finalizar, fez-se um loft entre todas as ligações das curvas.

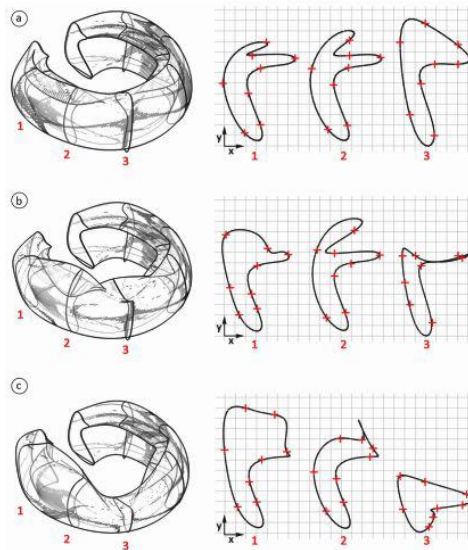
Figura 24 – Passos para obtenção da forma pretendida.



Fonte: Neto et al. (2014)

No desenvolvimento do modelo de massa paramétrico inicial, tornou-se possível a geração de vários estudos da forma básica. A busca pela melhor opção se deu prioritariamente por critérios estéticos e ergonômicos.

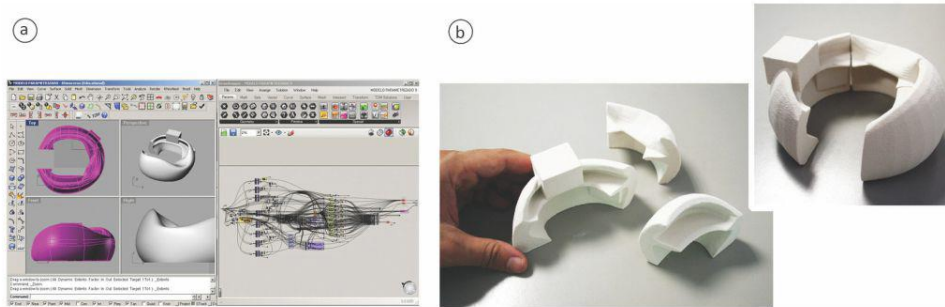
Figura 25 – Controle dos pontos (x,y) para geração da massa conceitual do balcão



Fonte: Neto et al. (2014)

Com o modelo de massa realizado, foi feita uma impressão em 3D para checagem de estabilidade, e foram feitos alguns ajustes para que o balcão não se inclinasse.

Figura 26 – Projeto algorítmico (a) e modelo físico (b) do balcão



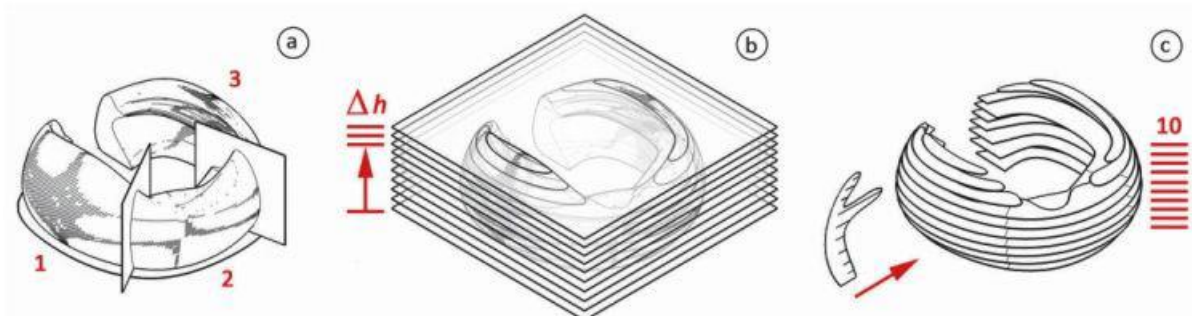
Fonte: Neto et al. (2014)

Para Neto et al. (2014) a experiência do projeto integrado descreve como as diversas características do produto são incorporadas no objeto final. Segundo os autores, a análise e a constante troca de informações realizadas entre os meios físicos e digitais podem fornecer um excelente feedback ao projetista, instrumentalizando os processos decisórios de forma contínua e integrada.

Com o conceito final adotado, partiu-se então para definição da arquitetura do produto (projeto em nível de sistema) decompondo-o segundo critérios funcionais e físicos.

Segundo Neto (2014) para a construção física do modelo sem a necessidade de peças de conexão, foi adotada a estratégia de “estrutura de caixa de ovos”. Com o modelo parametrizado, foi possível a geração automática dos entalhes nas seções vertical e horizontal, através de subtração sólida. Isto permitiu que esses entalhes fossem atualizados automaticamente na medida em que se altere a curva principal e as curvas verticais.

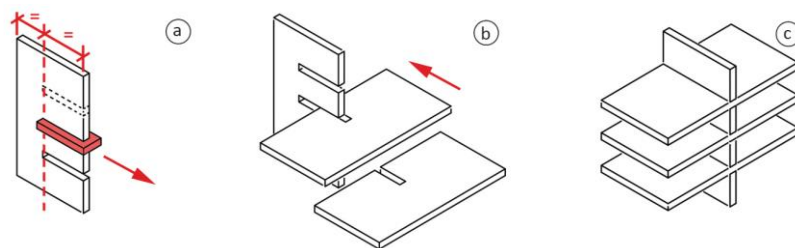
Figura 27 – Definição da montagem do Balcão Samba. (a) – Planos verticais (b) – Planos horizontais com delta h (c) – Pedacos resultantes.



Fonte: Neto et al. (2014)

Os modelos em escala nesta fase e o objeto final foram produzidos com Máquinas que podem cortar automaticamente materiais planos, com base em um arquivo digital: uma cortadora a laser e um cortador a plasma. Assim, foi necessário gerar desenhos digitais 2D com base no modelo 3D. Para tal fez-se uso do plugin RhinoNest para achatar as peças e organizá-las nas folhas de material. Devem ser gerados diferentes layouts de corte para o cortador a laser e o cortador de plasma, devido a diferenças nos parâmetros de cada máquina, como o tamanho das tabelas e a margem de segurança.

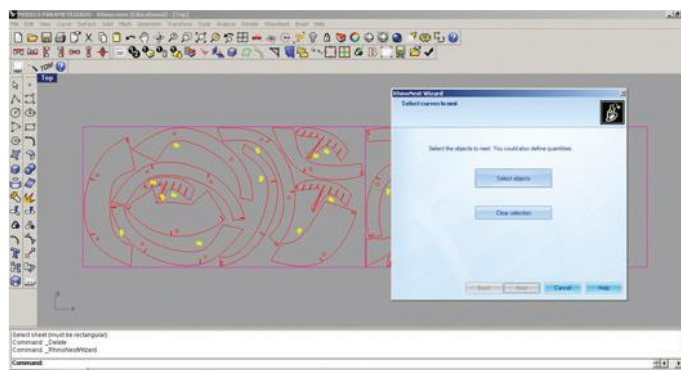
Figura 28 – Geração automática dos entalhes por subtração sólida.



Fonte: Neto et al. (2014)

Esta fase começou com o alinhamento de todas as partes do objeto no plano base horizontal. Em seguida, cada parte foi identificada automaticamente pelo plugin com um número correspondente à sua posição no modelo 3D. As peças foram então dispostas automaticamente pelo plugin dentro dos limites da folha de material disponível para cada caso (o papelão usado para o modelo e a folha de metal usada para o objeto final).

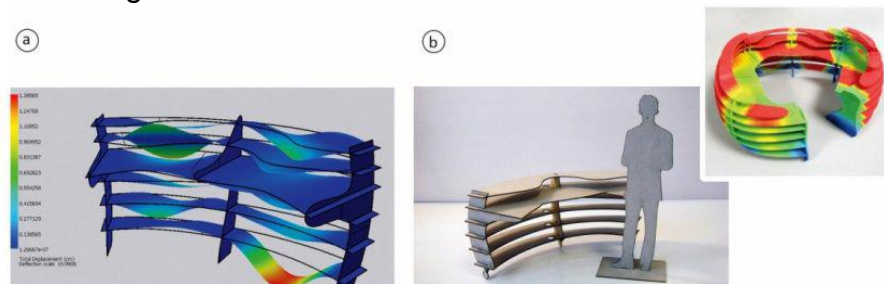
Figura 29 – Otimização da superfície para planificação das peças.



Fonte: Neto et al. (2014)

Nesta etapa do projeto, abordou-se as questões de avaliação e construção do balcão. Um primeiro passo foi a utilização do plug-in *Scan-and-Solve* para gerar um modelo de elementos finitos que mostrasse as áreas vulneráveis do produto, como os esforços entre o tipo de material e os vãos de balanço. Os resultados da análise da estrutura identificaram dois problemas estruturais: 1) excesso de deflexão em algumas superfícies horizontais (verificada no modelo virtual); e 2) instabilidade lateral do conjunto (verificada no modelo físico). Em um dos modelos físicos feitos pela equipe, uma impressão a cores foi realizada para a visualização rápida e tátil das diferentes partes do objeto, verificando-se assim a necessidade de se rever o projeto.

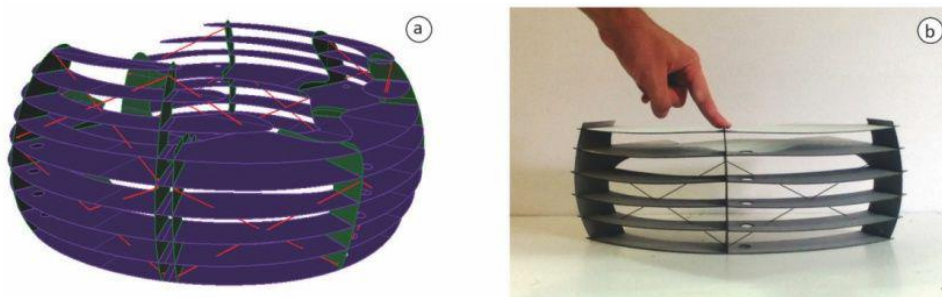
Figura 30 – Testes nos modelos virtuais e físicos.



Fonte: Neto et al. (2014)

De acordo com Neto (2014) estes problemas foram resolvidos primeiramente utilizando de vigas metálicas sob as prateleiras e o segundo aplicando-se cabos de aço tracionados. O uso dos cabos permitiu também fixar as extremidades das prateleiras em balanço. Para que o modelo paramétrico fosse completo, foram inseridos no modelo tridimensional elementos cilíndricos que representavam os cabos. Assim, foi possível definir corretamente o posicionamento de todas as perfurações que atravessaram as prateleiras intermediárias.

Figura 31 – Resolução dos problemas estruturais (a) – Modelo virtual; (b) – Modelo físico.



Fonte: Neto et al. (2014)



Neto et al. (2014) argumentam que as soluções adotadas para a resolução dos problemas estruturais do balcão não aumentaram significativamente o peso do produto, fato este que poderia ter ocorrido caso a espessura dos materiais a serem utilizados (aço) fossem aumentados. Uma segunda questão apontada pelos autores foi que no modelo físico utilizou-se papel cartão como material de teste, já que as chapas de MDF trariam ao modelo maior estabilidade, distorcendo os resultados finais. Para os autores, o uso de softwares de análise estrutural responde bem como alternativas projetuais em ambientes simulados, principalmente quando utilizado durante as etapas do processo de concepção (NETO et al., 2014)

A etapa de produção permitiu a aplicação do conhecimento obtido no chão de fábrica (precisão dos cortes a plasma, processos de soldagem, encaixes e montagens, diferentes tipos de materiais, entre outros) para que fosse possível concluir o processo do balcão, enviando para a fábrica o arquivo final já com as configurações corretas para a produção.

Figura 32 – Produção e montagem final (Balcão Samba)



Fonte: Neto et al. (2014)

A tecnologia digital contribuiu para o surgimento de novos papéis para o designer de acordo com a natureza de sua interação com a mídia. O designer hoje interage, controla e modera processos e mecanismos geradores e performativos. A informação tornou-se um "novo material" para o designer.

Em resumo, é possível dizer que este exercício ilustra um processo de design integrativo combinado com os avanços de fabricação, usando modelos computacionais e físicos. Neste caso, a fabricação não pode ser vista como apenas uma saída de uma técnica de modelagem virtual; está completamente interligado no processo de design, com um impacto na forma final do objeto.

O caso de estudo Samba Desk serviu como base metodológica para a realização deste trabalho, tendo grande importância como relato de pesquisa e processos.

#### **4. CAPÍTULO 4 – CASO PRÁTICO : PAVILHÃO WAFFLE**

Neste capítulo 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 e avaliar e fabricar um pavilhão em MDF seguindo o conceito de *waffle* como foi tratado no capítulo 2. 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.

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.

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 dos *mockups*.

Os *mockups* 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.

No fim do processo de design, a etapa de detalhamento das peças com técnicas digitais como distribuição adaptativa dos nós (topologia das conexões) e a preparação para a fabricação digital, que deve ter o enfoque no processo de trabalho e montagem, e em como serão definidas as etapas de construção deste modelo.

A documentação de todo o processo vai ser fundamental para esta fase de metodologia. A descrição das etapas bem como as alternativas, dificuldades e possibilidades encontradas durante todo o processo traduzem de maneira prática o tema abordado por este trabalho.

Dessa maneira, este capítulo tem como principal objetivo a descrição de 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 que utiliza-se de fabricação digital orientada dentro da interface de programação algorítmica gráfica. 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.

O capítulo faz uma documentação de todo o processo de desenvolvimento do protótipo, relatando a seleção de critérios, as estratégias computacionais que fundamentaram o conceito desejado, assim como a descrição de cada uma das etapas, desde a realização do conceito e a codificação de sua geometria, até o as simulações, testes e disposição final. Como constatado nos capítulos 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.

#### **4.1 SELEÇÃO DE CRITÉRIOS E PROCESSO DE DESIGN**

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 tem 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.

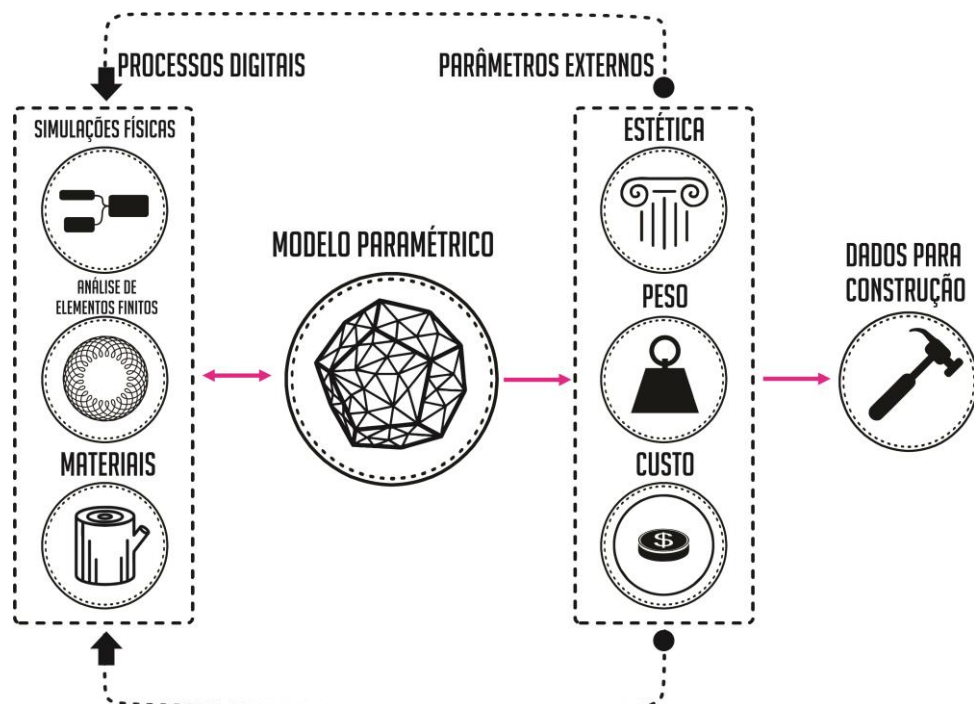
A instalação do modelo deverá ser realizada entre o atual galpão do departamento da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora. Tendo como parâmetros iniciais dimensões de 3 x 3 x 2,5 (largura, comprimento, altura).

O ponto inicial para o começo da elaboração do partido tectônico se deu através de várias restrições reais 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”.

Dessa maneira, a descrição do partido do projeto é que seja uma estrutura leve de material de fácil manejo e aquisição (MDF), que sirva como uma investigação prática sobre novos métodos vinculando projeto e prototipagem, com uma restrição orçamentária de custo total baixa e que não necessite de técnicas de marcenaria ou profissionais mais específicos para sua montagem.

Figura 33 - Diagrama de relações entre os parâmetros externos e digitais a serem considerados dentro do processo projetual.



Fonte: Elaboração Própria

## 4.2 ESBOÇOS E ITERAÇÕES DIGITAIS – A SELEÇÃO DE CRITÉRIOS

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.

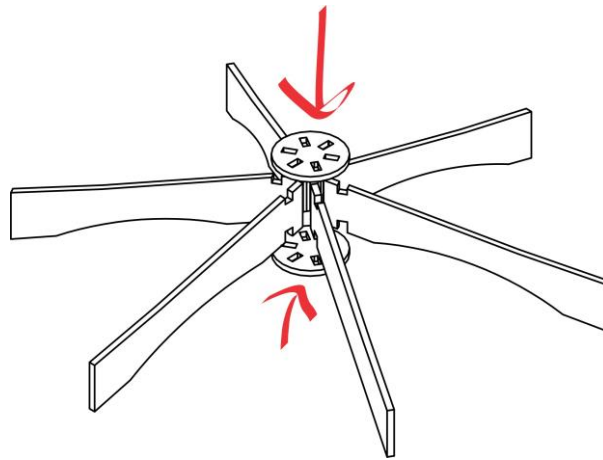
Os métodos paramétricos de registro da geometria são caracterizados por uma relação diferente entre o designer e o modelo, se comparada à modelagem direta (por exemplo, manipulação manual dos pontos de controle NURBS da curva). Um modelo paramétrico não contém uma descrição de uma forma rígida, mas a 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.

O tectonismo como informa Schumacher (2017) é uma corrente de pensamento de design que está comprometido com tais práticas que exigem habilidades e conhecimentos adicionais, e que entregam um novo e rico repertório formal de articulação. Esses novos poderes articulatórios podem ser empregados em uma agenda de design de comunicação explicitada: Design é comunicação (SCHUMACHER, 2017).

### 4.2.1 A PRIMEIRA EXPERIÊNCIA

A primeira ideia tinha como partido uma estrutura formada pela junção de vários componentes com o uso de modelagem generativa, que se formava com encaixes compostos por peças circulares que distribuem peças longitudinais em painéis com ordenamentos hexagonais, que através de compressão dos encaixes se conectam ajustando as subdivisões e proporcionando a estabilização da superfície.

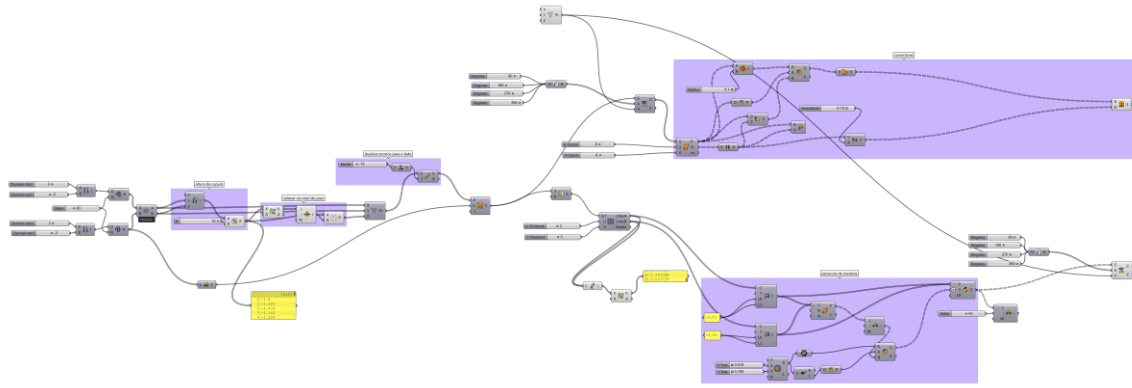
Figura 34 - Diagrama do partido construtivo da primeira ideia.



Fonte: Elaboração Própria

Começando a entender as questões geométricas e formais, é desejado que se crie uma forma de “casca” com dupla curvatura simples que deve ser subdividida em células planares em uma “tesselação”. As primeiras experiências envolveram a geração de superfícies *bspline* e as convertendo em malhas, que atuavam como “tela” para a colocação dos nós, que são então deslocados no vetor de suas normais, no intuito de que as distâncias entre eles se normalizem (tornem-se tão semelhantes quanto possível).

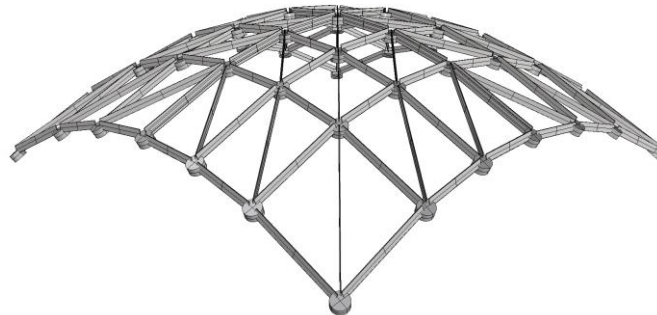
Figura 35 - Uma das Primeiras tentativas de Definição da geometria.



Fonte: Elaboração Própria

Estas primeiras tentativas colocaram luz sobre a principal questão envolvida dentro desse processo. O enriquecimento da representação é de extrema importância através do detalhamento das peças que se consolidam nos nós e conexões da estrutura. Estas conexões necessitam ser precisas e possuírem viabilidade, ainda que feita apenas de maneira visual para que seja levada para a máquina de corte CNC.

Figura 36 - Superfície Gerada através da definição acima.



Fonte: Elaboração Própria

As primeiras tentativas da escrita do código encontraram diversos problemas tais como conflito entre peças bem como pouca possibilidade de variação paramétrica.

Dessa maneira alguns conceitos e aplicações de matemática em geometria foram necessários para que houvesse um melhor entendimento e otimização da estrutura desejada no desenvolvimento da definição para atingir a forma desejada.

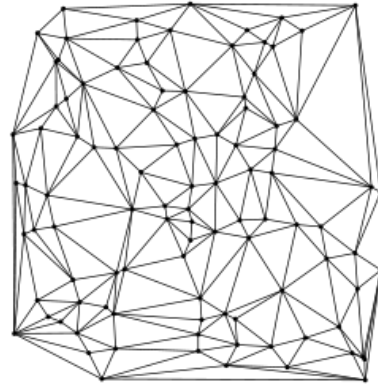
Essas aplicações vieram a solucionar problemas de incompatibilidade e conflitos geométricos que estavam inviabilizando a forma.

Na resolução do problema que apontava para a normalização da distância entre os nós, foram necessários a introdução de técnicas matemáticas, que são muito frequentes e necessárias para a descrição do espaço geométrico e de um melhor desempenho da modelagem paramétrica. Aplicou-se então um conceito de diagrama de Voronoi, (também chamado de Tesselação de Voronoi, Decomposição Voronoi ou mesmo Mosaico de Dirichlet), e que pode ser encontrado e utilizado em diversos campos da ciência e da tecnologia. Um Diagrama de Voronoi é definido como uma decomposição especial de um espaço determinado, como por exemplo: um espaço métrico, que é estabelecido pela distância para uma determinada família de objetos (subconjuntos) no espaço. Segundo Aurenhammer (1991) cada um desses objetos está associado a uma célula de Voronoi correspondente, isto é, um conjunto de todos os pontos no espaço dado para qual a distância para esse objeto dado não é maior que sua distância para outros objetos.

Diagramas de Voronoi de retículas regulares em pontos localizados em duas ou três dimensões dão origem a diagramas muito familiares entre si. O reticulado 2D possibilita um diagrama que se assemelha a um favo de mel irregular, com hexágonos distribuídos ao longo de pontos simétricos. No caso de uma malha triangular, ele torna-se regular, e no caso de uma malha retangular, os hexágonos são reduzidos à retângulos em linhas e colunas. Sendo assim, o uso do Voronoi parte do princípio de que qualquer superfície não euclidiana, pode ser triangulada para geração de malhas que se adaptam com as geometrias desejadas.

Outra função utilizada envolvendo computação, modelagem e matemática foi o uso de triangulações Delaunay. No plano, a triangulação de Delaunay maximiza o menor ângulo. Comparada com qualquer outra triangulação de pontos, o menor ângulo na triangulação de Delaunay é pelo menos maior do que o menor ângulo em qualquer outra triangulação. Para modelar terrenos ou outros objetos a partir de uma amostra de pontos, a Triangulação de Delaunay fornece um conjunto de triângulos para utilizar como polígonos no modelo. Em particular, a Triangulação de Delaunay evita triângulos magros (possuem circunferências grandes em comparação com suas áreas).

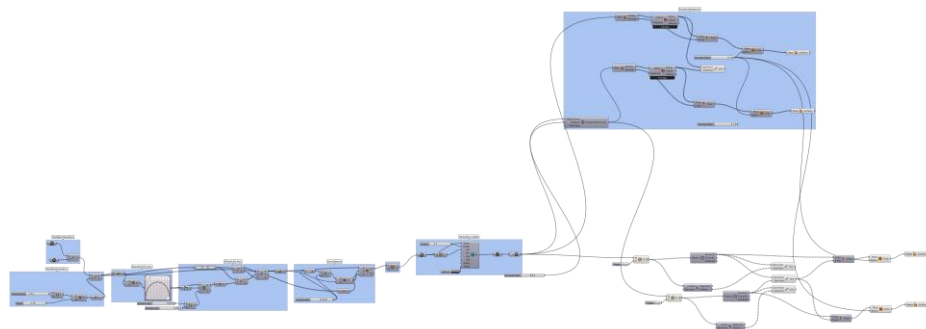
Figura 37 - Triangulação de Delaunay de um conjunto de 100 pontos aleatórios no plano.



Fonte: <https://goo.gl/zmDcJt>

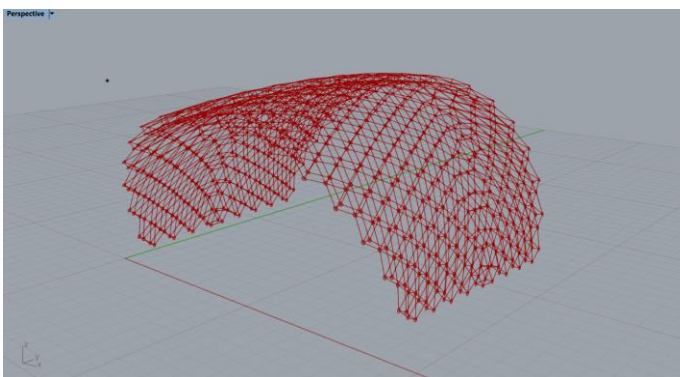
Dessa forma como falado anteriormente a triangulação de Delaunay maximiza o menor ângulo de todos os triângulos na triangulação; esta tende a evitar triângulos com ângulos internos muito pequenos, fazendo assim com que a descrição final da geometria da superfície não formasse ângulos muito pequenos, resultando no conflito de peças e a impossibilidade estrutural de se realizar o modelo físico, com encaixes que não se ajustassem ou resultando em peças muito extensas ou diferentes entre si, dificultando também o processo de montagem do modelo final a ser prototipado.

Figura 38 - Correção do código e aplicação dos conceitos de Voronoi e Delaunay.



Fonte: Elaboração Própria

Figura 39 - Geometria resultante.



Fonte: Elaboração Própria

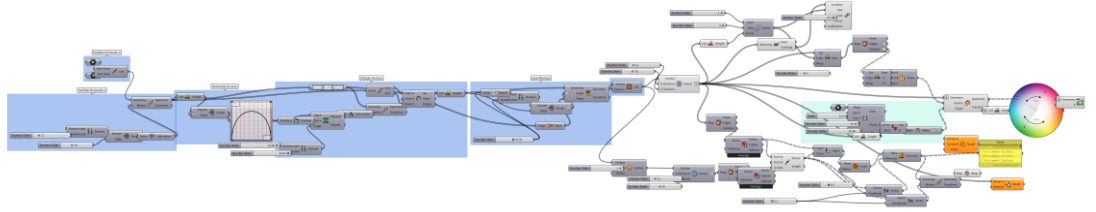
A utilização de *Add-ons* no *plug-in* Algorítmico *Grasshopper* auxilia de maneira a aumentar seu repertório de componentes que realizam diversas tarefas adicionais não encontradas em sua versão padrão, como simulações físicas, energéticas etc. Após as pesquisas realizadas dentro do âmbito geométrico e matemático, foram necessárias modificações dentro do código para a formalização desses conceitos e a otimização topológica da superfície.

Segundo Kolarevic (2005) através de métodos como otimização de topologia, é possível desenvolver morfologias avançadas e estruturais com um desempenho amplamente superior aos habilitados por métodos de projeto empíricos. Complementar a isso, as descrições numéricas de condições físicas permitem uma quantificação e concretização de relações abstratas, como a viabilidade de uma determinada forma para certos modos de produção, ou as relações econômicas entre geometrias e sua fabricação.

Ao atualizar continuamente a conectividade da malha para manter triângulos de tamanho uniforme e quase equilátero, mesmo as mudanças muito grandes nos limites da superfície tornam-se possíveis e a superfície ainda minimiza a curvatura média, isso permite assim a exploração de formas mais dinâmicas e flexíveis mantendo os limites das curvas e linhas especificados.

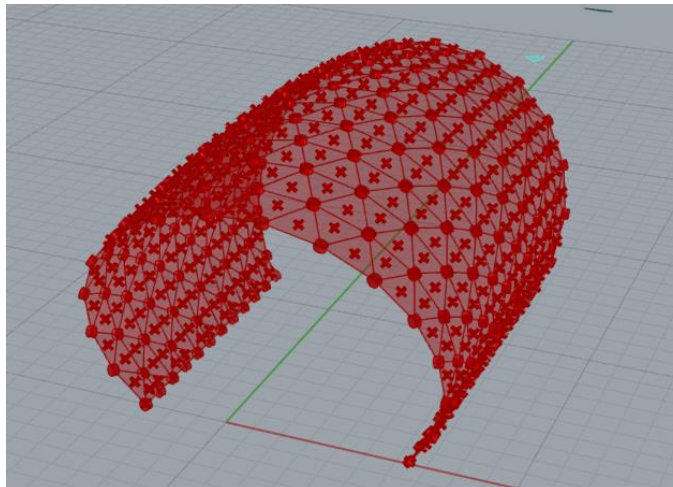


Figura 40 - Última definição da estrutura por compressão.



Fonte: Elaboração Própria

Figura 41 - Resultado da última definição obtida.



Fonte: Elaboração Própria.

Apesar do prosseguimento do conceito da ideia inicial por compressão, verificou-se uma dificuldade técnica de grande risco no que tange a viabilidade das conexões e peças, isso levaria a uma complexidade grande no projeto de montagem final do objeto, pelo grande número de peças necessárias para manter a estabilidade estrutural necessária, mesmo com a simplificação da geometria esse grande número de peças poderia acarretar também em um maior custo total do projeto. O relato desse processo fortalece o discurso de como a ferramenta de modelagem permite inúmeras possibilidades, deve estar sempre condicionada a uma lógica construtiva. Concluiu-se então que por motivos de restrições orçamentárias e de montagem e organização devido ao número total de peças, preferiu-se adotar uma nova estratégia de partido arquitetônico, que possibilitasse o mínimo risco possível, com menor custo e de facilidade de manuseio e montagem. Após algumas primeiras ideias, escolheu-se pela técnica de construção do tipo waffle, muito conhecida pelo icônico projeto Metropol Parasol de autoria de Jurgen Meyer arquitetos em Sevilha, Espanha.

### 4.3. PAVILHÃO WAFFLE – PARTIDO INICIAL

Ulrich e Eppinger (2000) argumentam que o processo de seleção do conceito geralmente requer várias iterações na medida em que as soluções são sistematicamente exploradas. Conforme Schumacher (2017), a diferenciação adaptativa das estruturas de sustentação de carga, a diferenciação adaptativa de volumes de acordo com o desempenho pretendido e as diferenciações derivadas das lógicas de fabricação empregadas, oferecem muitas oportunidades para a uma articulação tectônica diferencial.

De acordo com Kolarevic (2010), o crescimento da interface entre o arquivo digital e a produção tende a reduzir às etapas do projeto, com uma integração da equipe de projeto ao espectro sistêmico do processo, desde o desenvolvimento do conceito até a sua disposição final, antecipando possíveis problemas e gerando novas possibilidades de soluções. Segundo Yeluda (2004) assim como outros métodos de design, o uso de protótipos, precedentes e metáforas tem a intenção de fornecer ao projetista um ponto de partida para desenvolver o novo design.

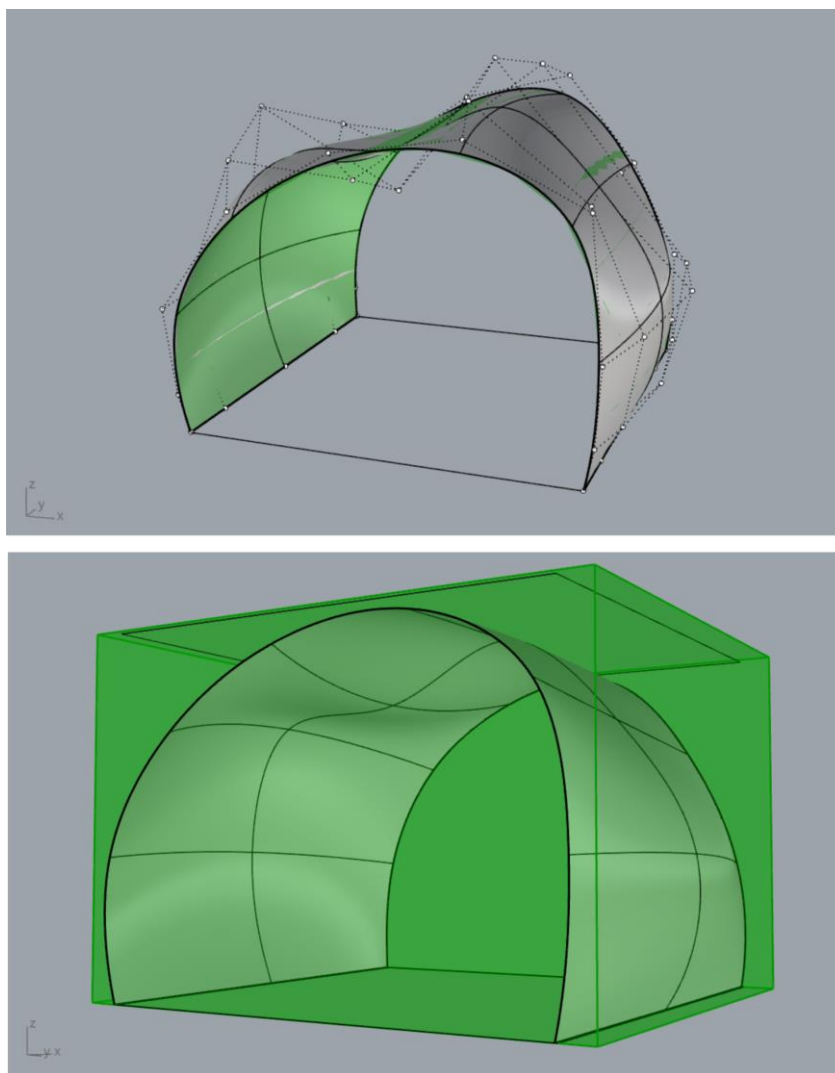
Em um afastamento radical das tradições centenárias e das normas do projeto arquitetônico, as formas geradas digitalmente não são projetadas ou desenhadas como o entendimento convencional que estas ações indicam, mas são calculadas pelo método de design computacional escolhido. *“Em vez de modelar uma forma externa, os projetistas articulam uma lógica generativa interna, que então produz, de maneira automática, uma gama de possibilidades a partir das quais o projetista poderia escolher uma proposição formal apropriada para desenvolvimento posterior”* (KLINGER ET AL. 2008).

A geometrização e modelagem da forma e de suas primitivas 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 *“Bounding 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.

Figura 42 – Pontos de controle e Caixa Delimitadora da Superfície.



Fonte: Elaboração Própria.

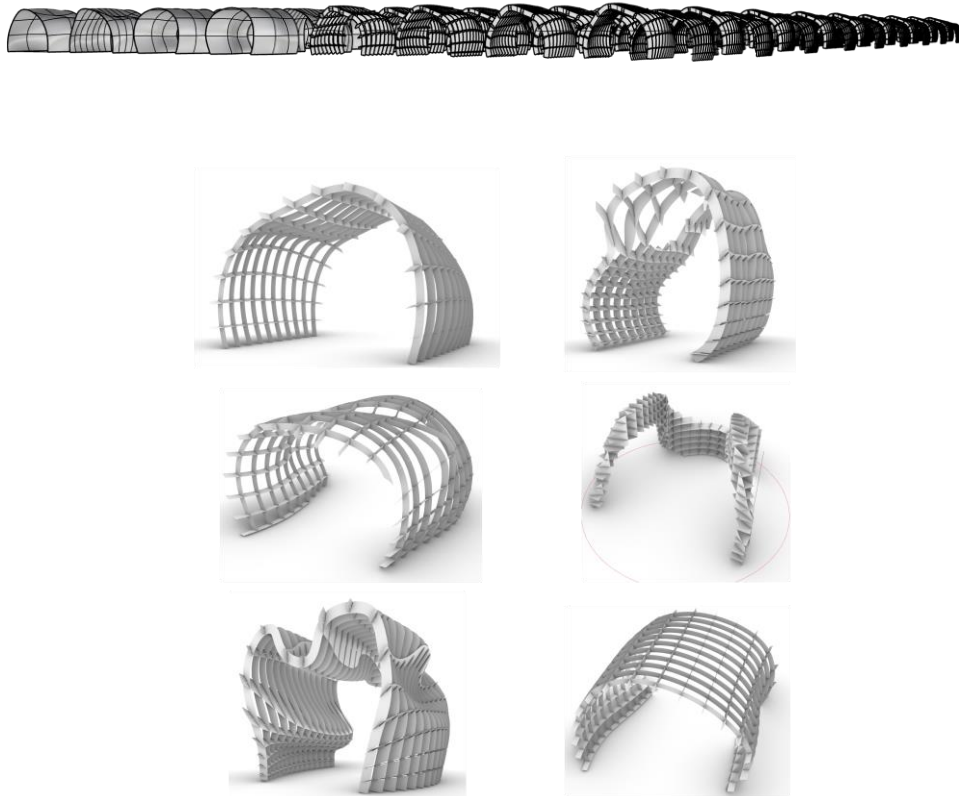
Após a realização da superfície primitiva, precisou-se realizar ainda algumas outras operações de modelagem como a necessidade de se estabelecer uma

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.

#### **4.3.2 MODELO PARAMÉTRICO – GEOMETRIZAÇÃO E CODIFICAÇÃO DA FORMA**

Foram utilizados na definição 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](http://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). Ele além dos inputs de parâmetros básicos como espessura, número de lâminas do modelo e profundidade dos entalhes, ainda gera uma operação booleana de planificação automática das chapas geradas.

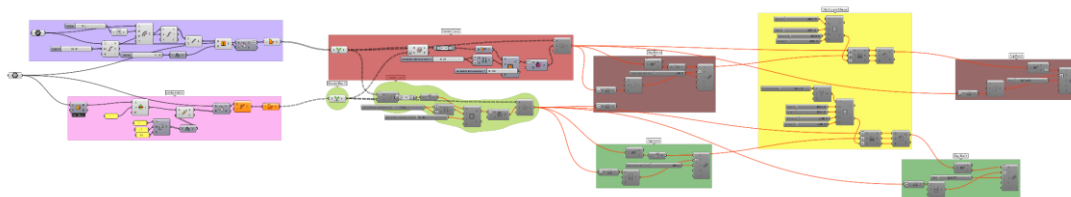
Figura 43 - Iterações da forma.



Fonte: Elaboração Própria.

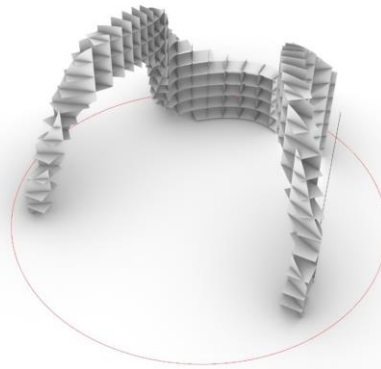
Por fim, ainda é possível usar um outro componente presente do Bowebird que permite a identificação das chapas planificadas e a orientação das mesmas. Outro importante *plugin* presente na definição usada para obtenção da forma foi o *Pufferfish*, que possui uma série de componentes voltados essencialmente 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 44 - Definição da estrutura em Waffle por seccionamento de “caixa de ovos”.



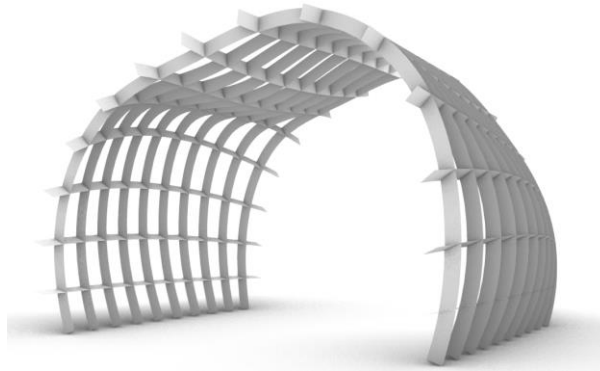
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 45 - Waffle Radial.



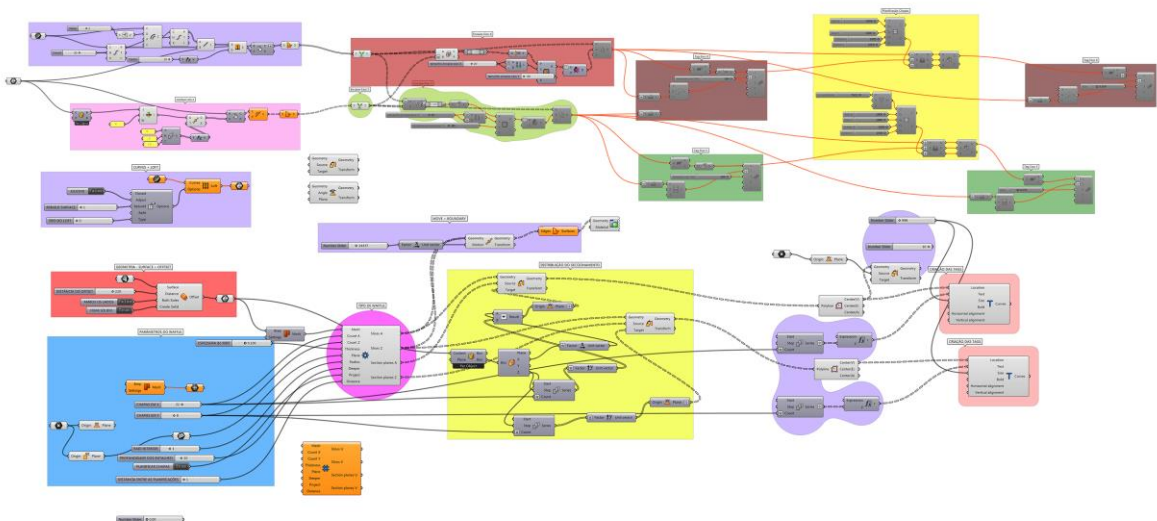
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 46 - Waffle Linear.



Fonte: Elaboração Própria.

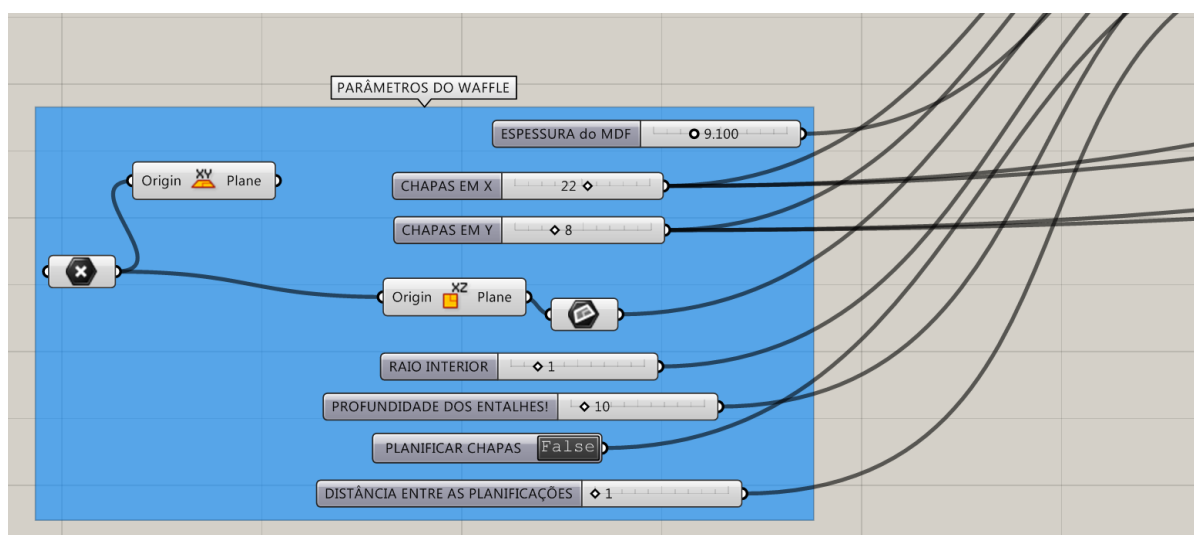
Figura 47 - Definição utilizada na Forma Final.



Fonte: Elaboração Própria.

É importante destacar na pesquisa, a simplificação do código, 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*.

Figura 48 - Definição utilizada na Forma Final.



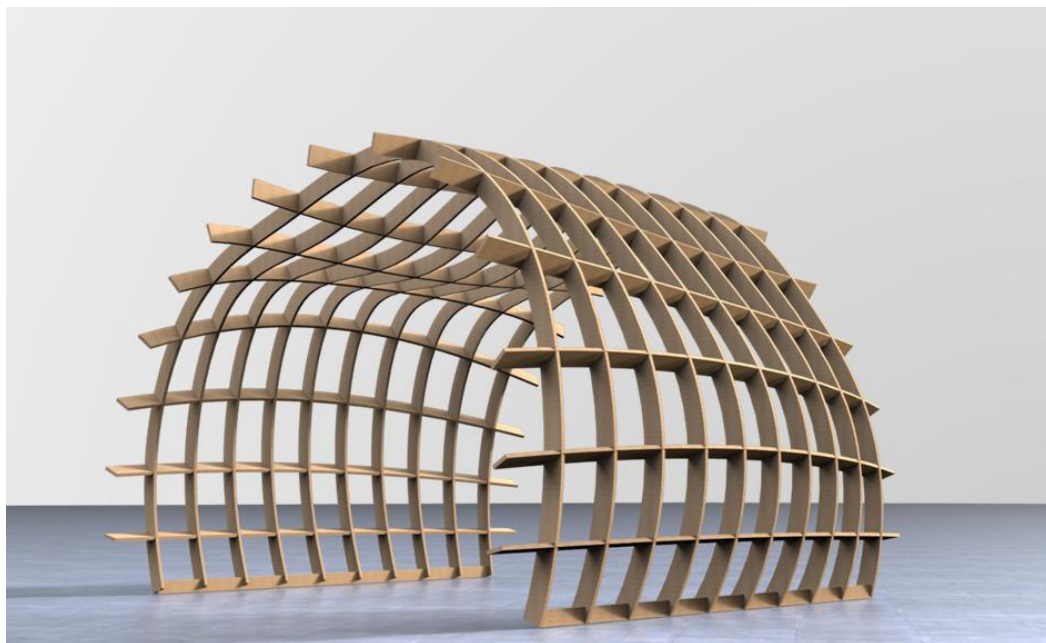
Fonte: Elaboração Própria.

Podemos ver em detalhe 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.

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 49 – Render do Pavilhão Waffle 1.





Fonte: Elaboração Própria.

#### 4.3.3 VIABILIDADE, ANÁLISES E SIMULAÇÕES

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. Segundo pesquisas na área de design e fabricação, 70 a 80% do custo do produto é determinado no estágio de concepção, as simulações geométrico-físicas no caso preveem testes de rigidez, stress e comportamento da forma e do material, guiando assim futuras modificações melhor embasadas, já que pode-se fazer a seleção de comparação entre diferentes alternativas de design.

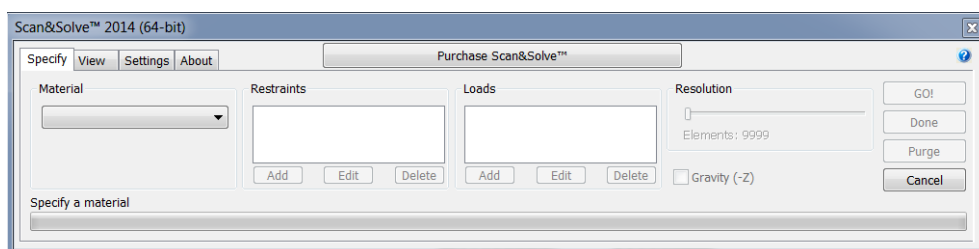
Para tal, neste momento do projeto, pretendeu-se a avaliação da estrutura do abrigo através de simulações virtuais com utilização do *plug-in Scan-and-Solve* na geração de gráficos sobre o modelo CAD 3D com análises de elementos finitos, que



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. 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 50 - Janela inicial do Scan-and-Solve.



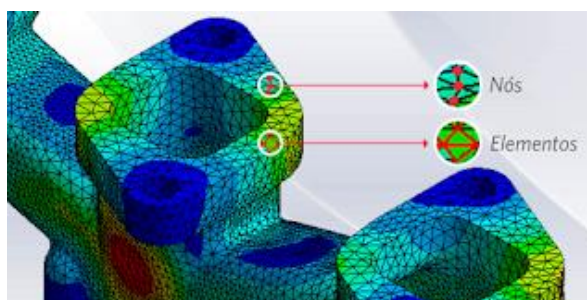
Fonte: Elaboração Própria.

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. 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.

Figura 51 - Demonstração do método de elementos finitos e da relação entre nós e elementos de uma malha.



Disponível em: <https://goo.gl/m2SM8P>

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:

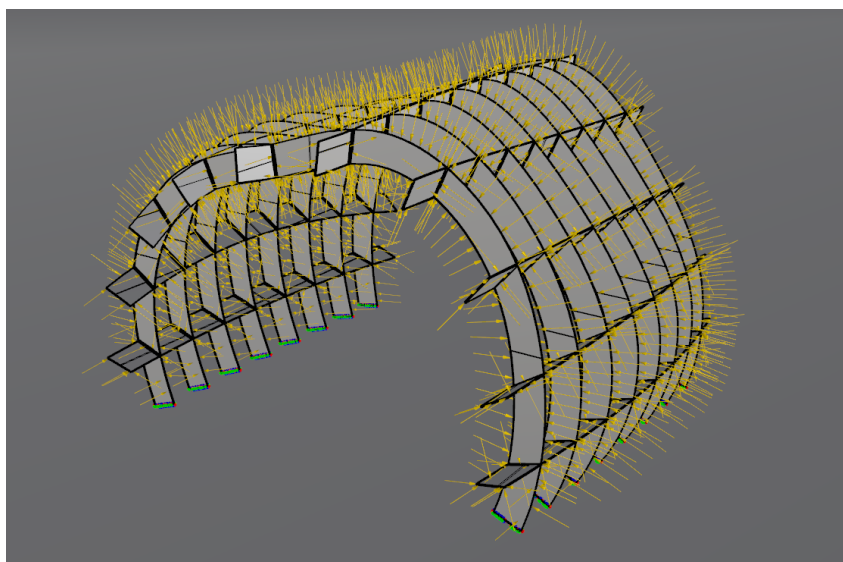
- Representação precisa de geometrias complexas
- Inclusão da propriedade de materiais
- Facilidade de representação da totalidade da solução obtida
- Captura de efeitos locais.

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 princípio foi escolhido um modelo com lâminas de 15mm de espessura que foi configurado dentro do Rhino para a simulação. 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. Logo após, é preciso especificar as propriedades do material do objeto. Devido as limitações desta pesquisa que fez uso de uma versão de avaliação do software Scan-and-Solve, foi necessário configurar o material, já que o mesmo não constava na lista de materiais padrões da versão de avaliação.

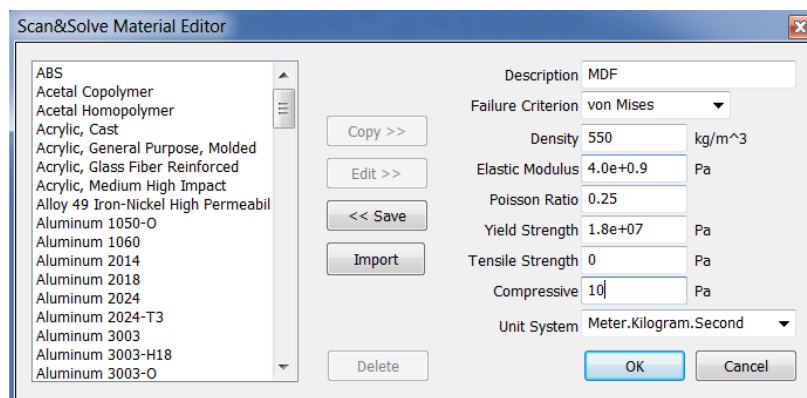
Figura 52 - Vetores e peso próprio da estrutura.



Fonte: Elaboração Própria.

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

Figura 53 - Janela do Scan-and-Solve com a descrição e especificação das características físicas do material.

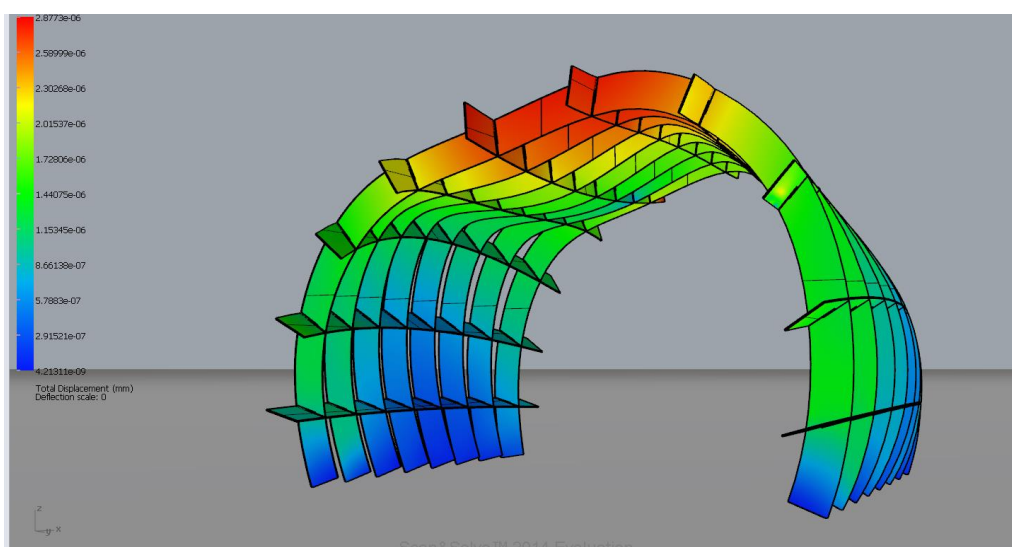


Fonte: Elaboração Própria.

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.

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.

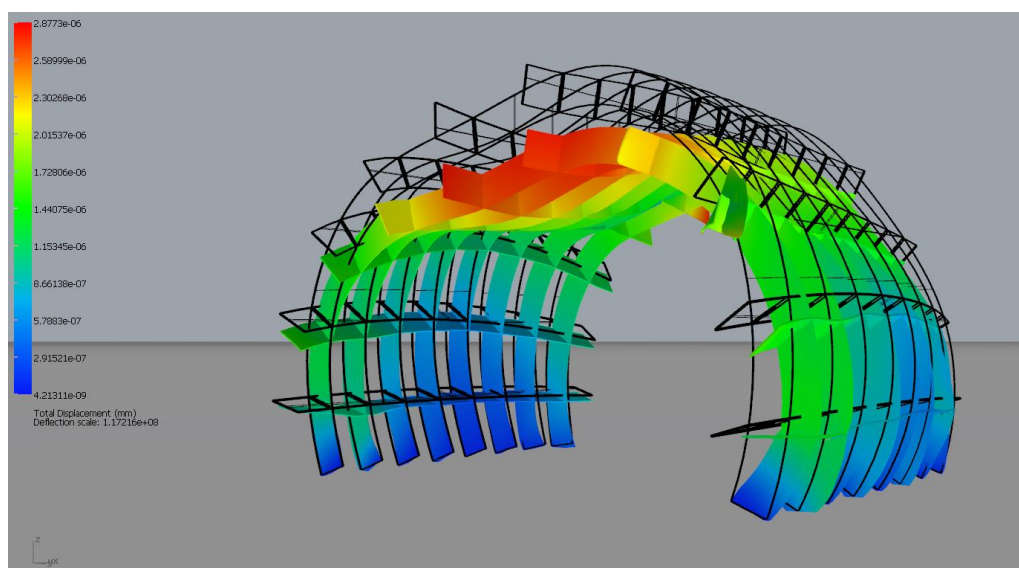
Figura 54 - Geometria gerada com o uso do Scan-and-Solve. Gráfico de deslocamento total das peças.



Fonte: Elaboração própria.

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.

Figura 55 - Geometria gerada com o uso do Scan-and-Solve. Gráfico de deslocamento MÁXIMO total das peças.



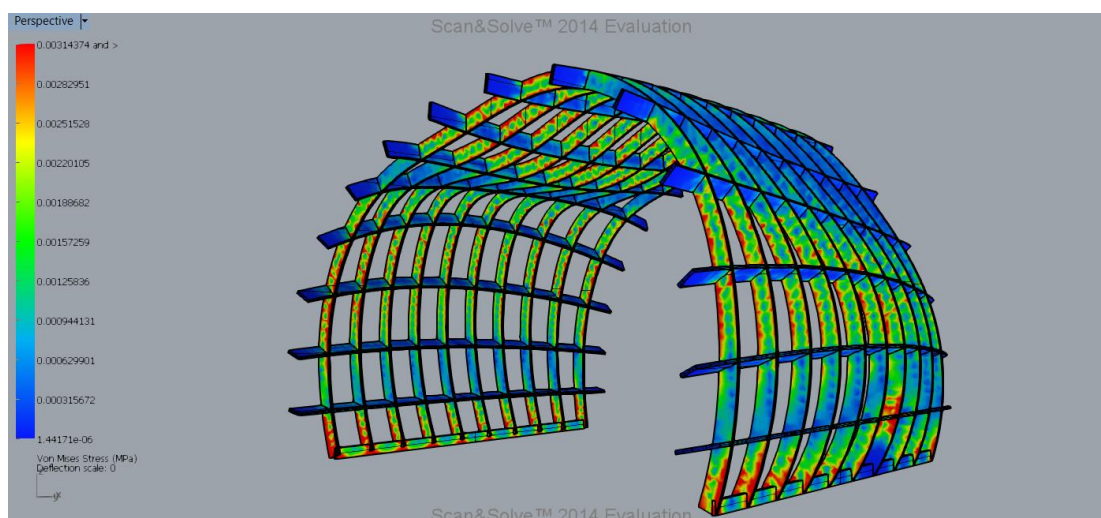
Fonte: Elaboração própria.

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.

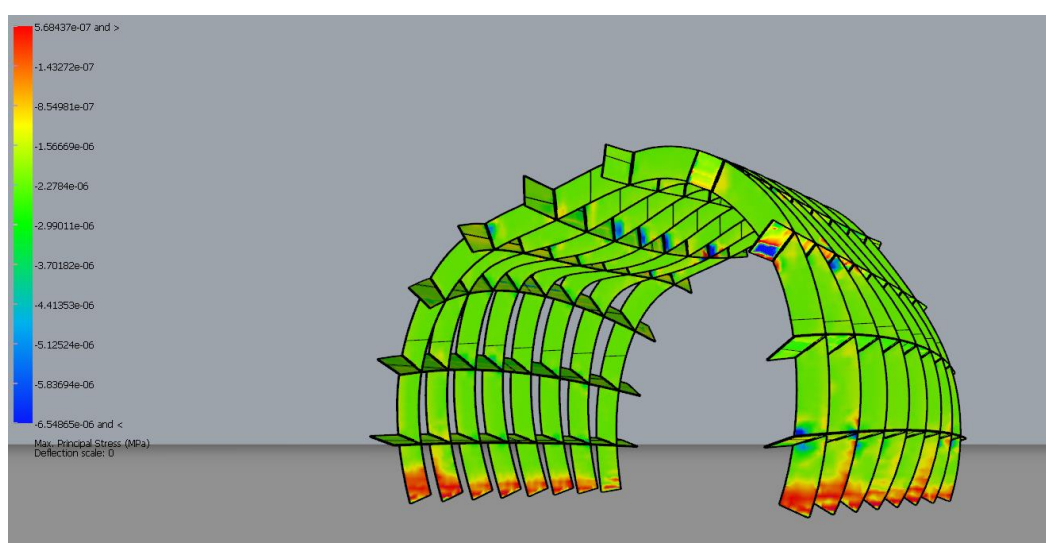
No presente estudo foi feita a análise estática linear, já que a estrutura apresenta comportamento linear na relação força x deslocamento e também na relação tensão x deformação.

Figura 56 - Nível de Stress - Método Von Mises.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 57 - Nível de Stress - Método Von Mises.



Fonte: Elaboração Própria.

Apesar das limitações, 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.



#### 4.3.4 PLANEJAMENTO – FABRICAÇÃO, PRODUÇÃO E EXECUÇÃO

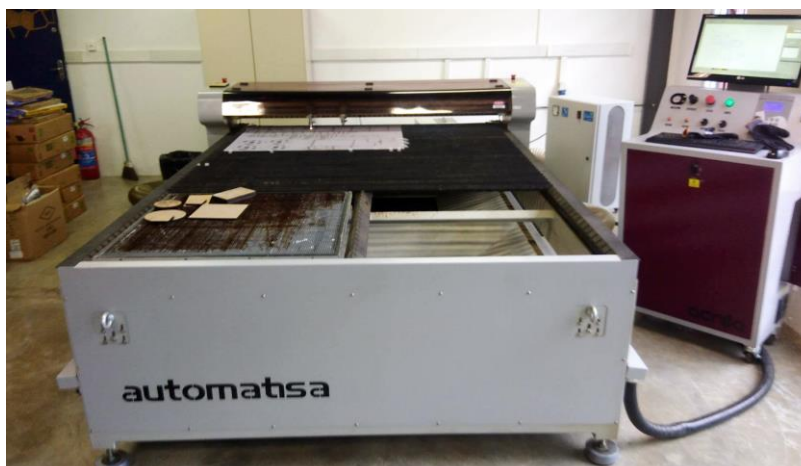
Da arquitetura vernacular à arquitetura contemporânea, sempre fomos limitados às propriedades dos materiais disponíveis. Seja fornecido pela natureza (por exemplo, areia e pedra) ou sintético (por exemplo, plástico e concreto), os arquitetos foram obrigados a analisar e implementar estrategicamente materiais de acordo com os pontos fortes de suas propriedades prevendo assegurar estabilidade estrutural e atingir as qualidades previstas. No entanto, com os avanços tecnológicos recentes, como a programação algorítmica e a impressão 3D (mesmo de materiais não convencionais, como compósitos e tecidos biológicos), nos permitiram passar de tijolos de alvenaria e rochas em estruturas mais leves, elásticas e adaptativas, otimizando o desempenho estrutural com o mínimo material.

Ulrich e Eppinger (2012) apontam para o fato de que o teste do conceito verifica eventuais deficiências no plano do projeto, para que sejam corrigidos durante o seu desenvolvimento.

Dessa maneira, antes de se executar o projeto são necessárias obrigatoriamente a realização de testes estruturais em modelos de diferentes escalas para analisar e garantir o funcionamento e a estabilidade dos encaixes e uma parte da estrutura total para averiguação da montagem e da precisão do corte na máquina CNC.

Algumas considerações sobre o maquinário utilizado na experimentação. A máquina de corte a laser utilizada 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 58 - Máquina de Corte à Laser utilizada para o experimento.



Fonte: acervo próprio.

Utilizar o desempenho de materiais como base de descoberta de forma generativa engloba uma série de oportunidades de design, ajudando na viabilidade e otimização estrutural. Este método de design permite estudos avançados do próprio material em diferentes escalas, desde a junção detalhada com outros materiais até a integridade estrutural global do modelo. Analisar o desempenho do material permite um feedback rápido através de uma rápida flutuação entre prototipagem física, simulação generativa e iteração computacional. Isso forma um ciclo de *feedback* que permite que elementos repetitivos, como padronização e modulação em particular sejam mais eficientemente fabricados e possibilitem uma adaptação flexível ao ambiente local.

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.

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.

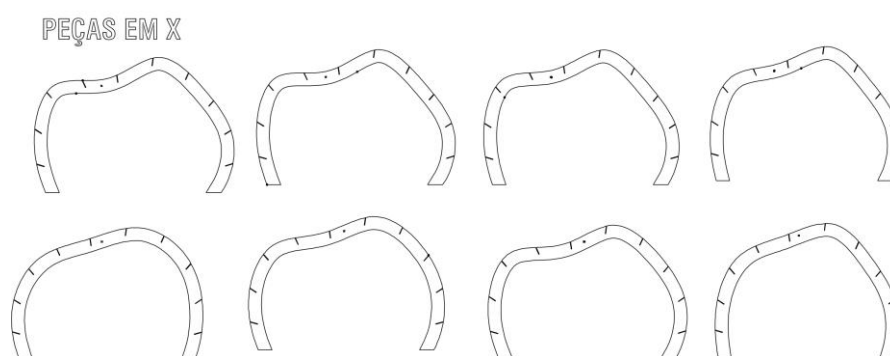


A tarefa da montagem do modelo físico foi destinada a fortalecer a compreensão das técnicas utilizadas no projeto, tais como: superfícies e malhas, otimização topológica, estruturas paramétricas de nós e entalhes e preparação para fabricação digital. O processo de produção das maquetes, possibilitou 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.

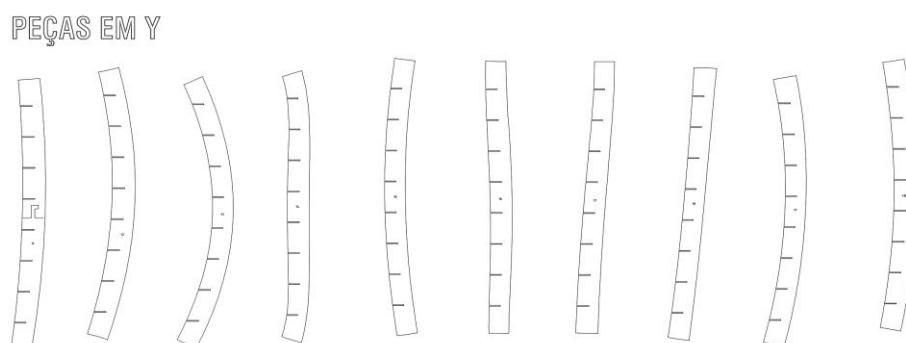
O componente ou modelo deve ser adequadamente distribuído sobre esta superfície de trabalho, a fim de orientar o processo de fabricação e fazer o melhor uso do material, reduzindo o tempo de trabalho. Atualmente há programas específicos como RhinoNest que são capazes de analisar o layout de formas planas 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.

Figura 59 – Planificações das peças em X.



Fonte: acervo próprio.

Figura 60 –Planificações das peças em Y.

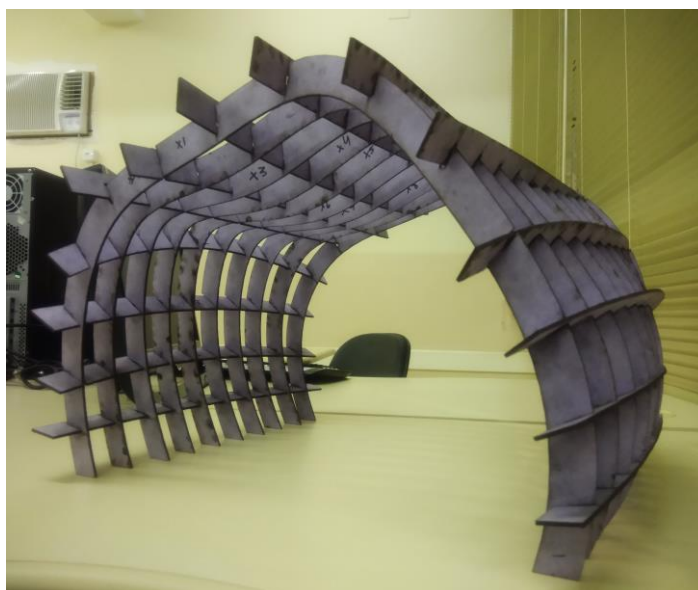


Fonte: acervo próprio.

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 64), 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.

Figura 61 – Maquete do Pavilhão Waffle Primeira opção.



Fonte: acervo próprio.

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).

Figura 62 – Maquete do Pavilhão Waffle Segunda opção.



Fonte: acervo próprio.

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.

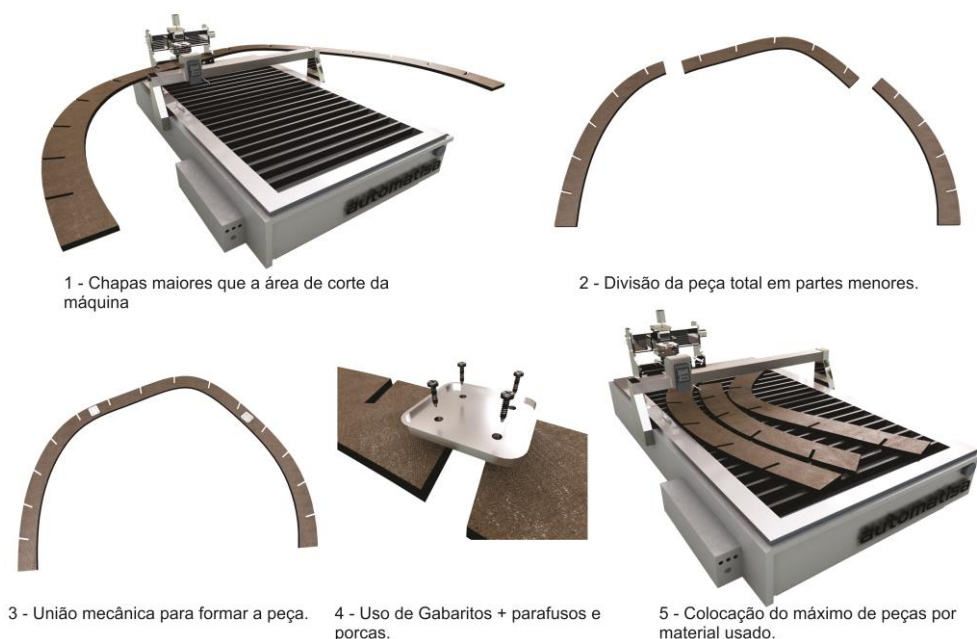
Por fim, fez-se um estudo de corte com 2 tipos de materiais prováveis para a execução do Pavilhão Waffle em escala 1:1. Os materiais escolhidos foram Madeirite (15mm de espessura) e MDF (9mm de espessura), para análise de qual densidade a máquina de Corte CNC disponível permitia. O material madeirite 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.

#### **4.3.5 PLANEJAMENTO DO PROJETO EM 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 63 – Esquema representativo da relação área de corte da máquina e tamanho das peças.

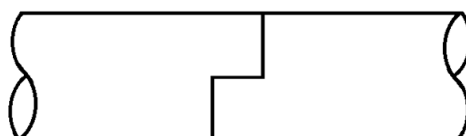


Fonte: acervo próprio.

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 66.) 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 64 – Representação de uma Viga Gerber.

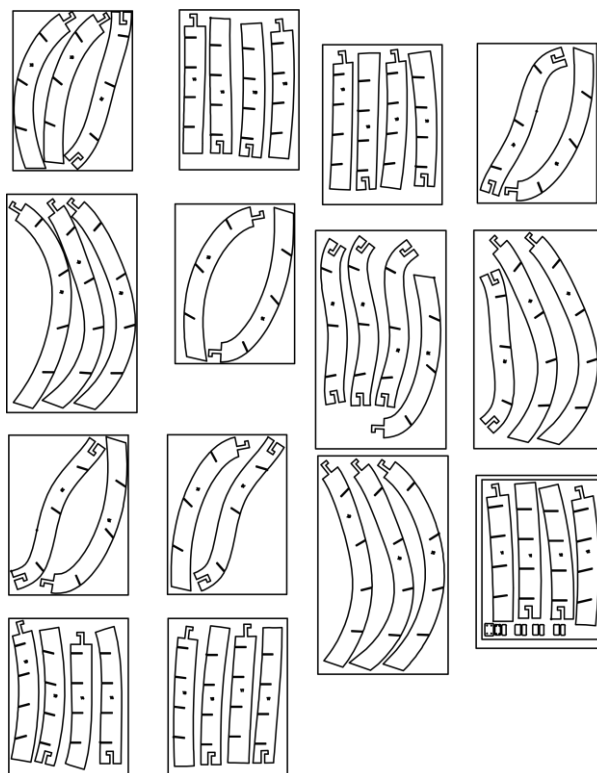


Disponível em: <https://goo.gl/uVBaHy>. Acesso em: 07/08/2018.

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.

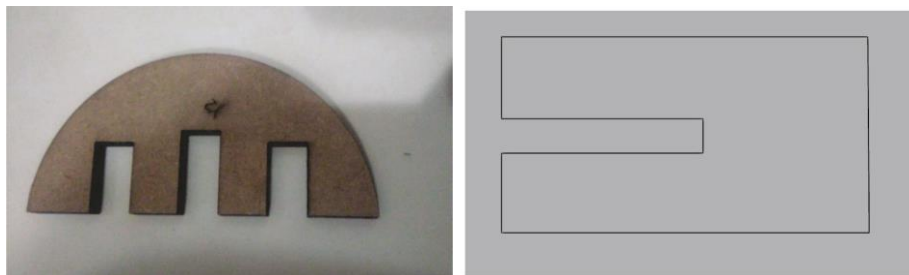
Figura 65 – Todos os planos de corte com os encaixes de Gerber.



Fonte: acervo próprio.

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 68).

Figura 66 – Teste da largura dos entalhes e vista de topo das sapatas.



Fonte: acervo próprio.

Foram necessárias 15 chapas de MDF e o tempo total de corte das peças, gabaritos e sapatas foi de aproximadamente 35 horas divididas em 8 dias de trabalho.

#### 4.3.6 O *WORKSHOP* DE PRODUÇÃO FINAL ETAPA 1

Esta seção apresenta um resumo da construção do pavilhão na escala em 1:1 que foi realizado 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 67. Gabarito, parafuso e porca necessários para a união da peça.



Fonte: elaboração própria.

Praticamente todos os elementos requerem montagens e seus processos de manufatura, normalmente, exigem a união de peças de diferentes materiais. Os processos de união mecânica geralmente se dividem em processos térmicos, processos com adesivos e processos mecânicos. A necessidade de se unir peças é bastante frequente no campo de aplicações técnicas, que são comumente encontradas na indústria automotiva, eletroeletrônica, construção civil, entre outras.

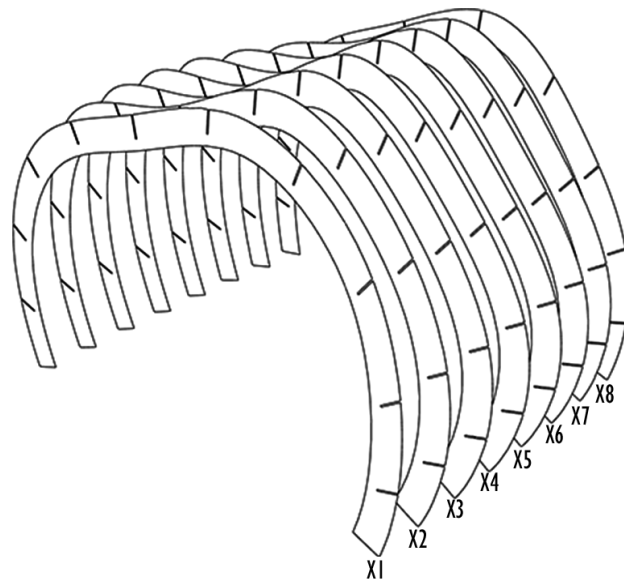
A dimensão do parafuso é conhecida popularmente por “M8”, tendo aproximadamente 8mm de diâmetro, com um cabeçote plano e de forma hexagonal. O comprimento do parafuso é de aproximadamente ‘32’ milímetros para vencer a peça base mais os dois gabaritos, permitindo ainda a colocação de uma porca para fixação.

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 na figura (NÚMERO DA FIGURA).

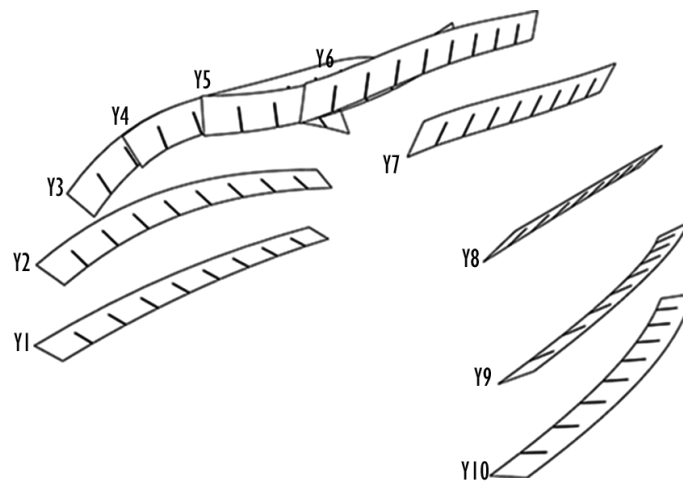


Figura 68 - Ordem das peças em “X”.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 69 - Sentido das peças em “Y”.

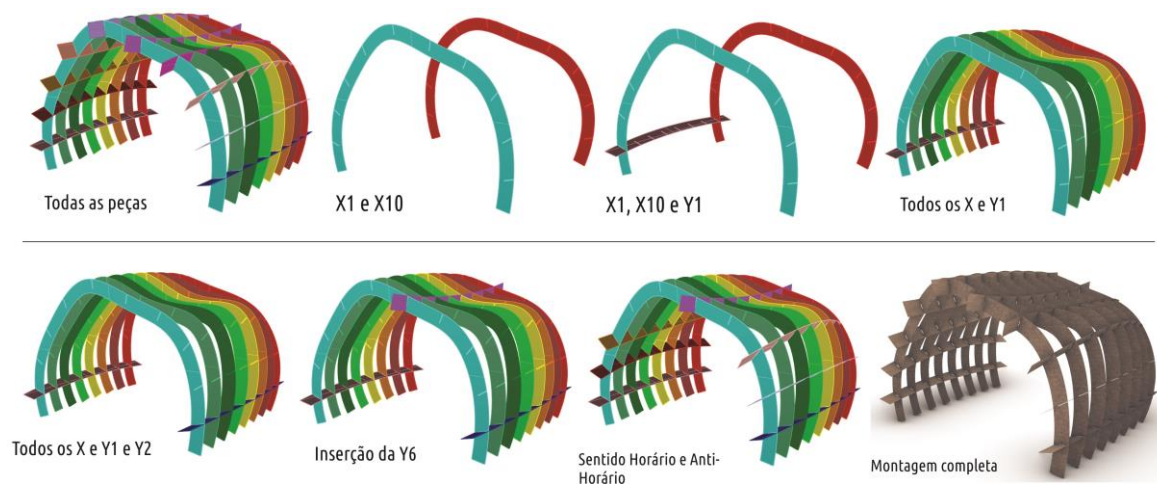


Fonte: elaboração própria.

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, conforme ilustrado na figura número 73:

Figura 70 - Plano de montagem do Pavilhão Waffle.



Fonte: elaboração própria.

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 71 - Montagem do Pavilhão Waffle através do workshop.



Fonte: acervo próprio.

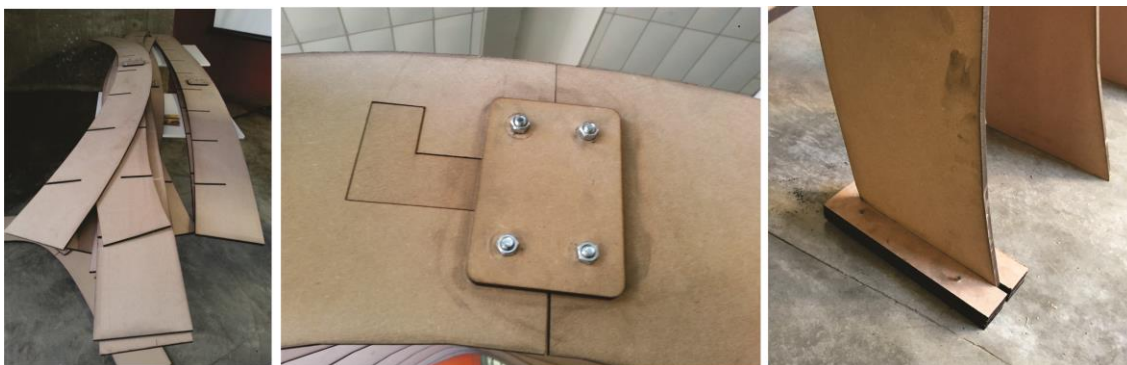
Figura 72 - Fotos do pavilhão Waffle.



Fonte: acervo próprio.

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.

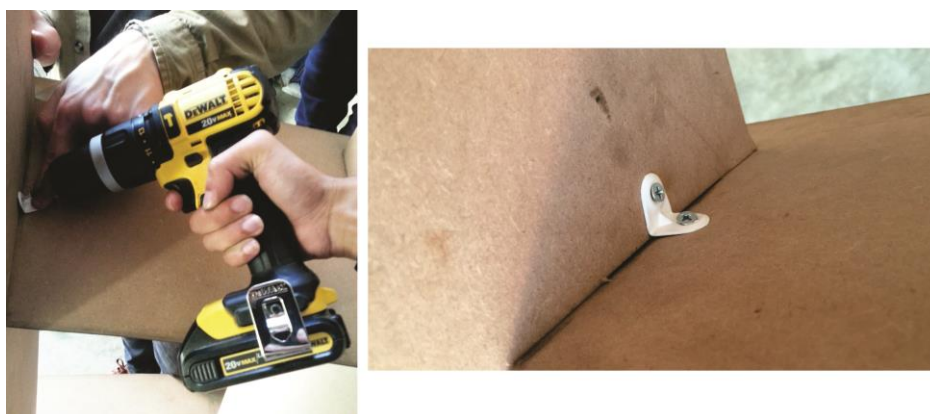
Figura 73 - Peças, Vista do encaixe de Gerber e gabarito parafusado e sapatas.



Fonte: elaboração própria.

Logo após a montagem completa da estrutura, foram parafusados perfis em “L” (Fig. 76) nos intertravamentos das peças, para proporcionar maior estabilidade de contraventamento à mesma. Contraventamento pode ser entendido como um sistema de ligação entre os elementos principais de uma estrutura com a finalidade de aumentar a rigidez da construção. É na Engenharia Civil um conceito de proteção de edificações contra as ações do vento. Esses perfis fazem com que aumente-se o trabalho da estrutura em tração, enquanto diminui os esforços em flexão.

Figura 74 – Colocação de Perfis em “L” para contraventamento da estrutura.



Fonte: elaboração própria.



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 78).

Figura 75 – Imperfeições causadas pela tolerância mínima dos entalhes.



Fonte: elaboração própria.

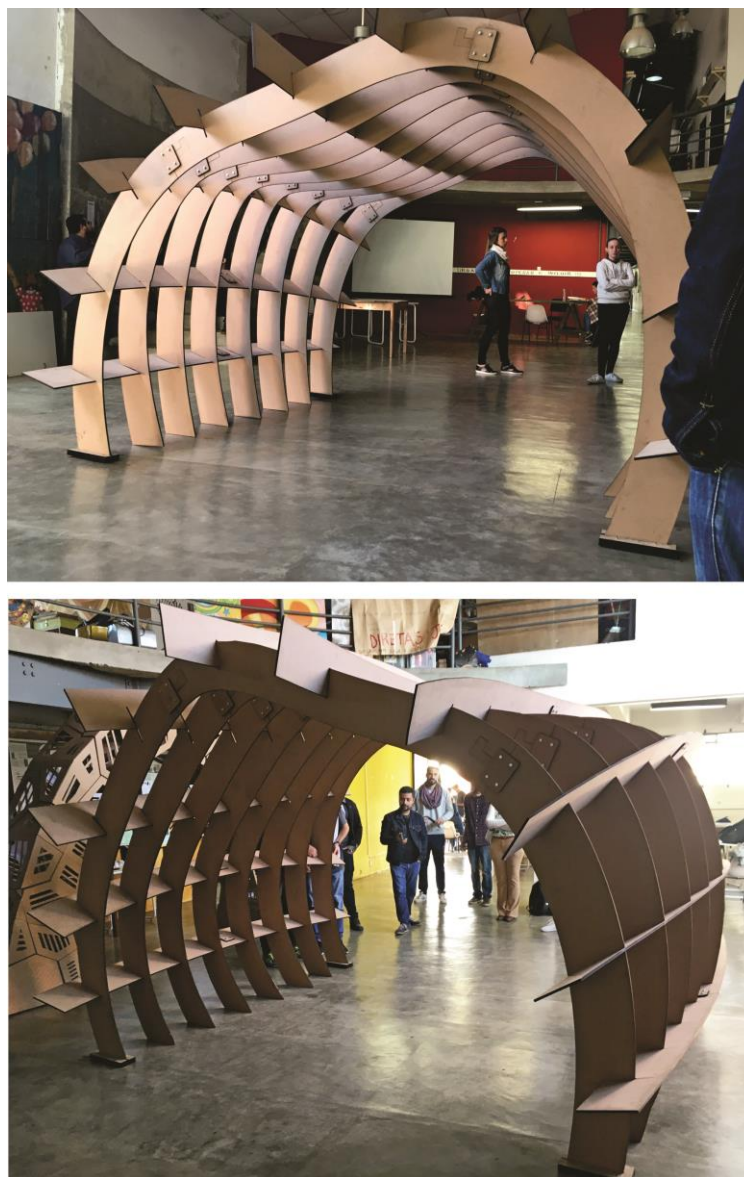
Ao final do *workshop* o pavilhão foi desmontado para as correções dos ajustes que foram observados na primeira experiência, principalmente pelo fato do mesmo estar localizado em um local de grande circulação de pessoas e ainda não ter oferecido em sua primeira montagem uma segurança de estabilidade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

Ainda assim os resultados finais corroboram as questões centrais apontadas por esta dissertação. 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.

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 76 – Pavilhão Waffle Primeiro Workshop.



Fonte: acervo próprio.

#### **4.3.7 O WORKSHOP DE PRODUÇÃO FINAL ETAPA 2**

O 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 tupia de operação manual, com uma broca de 14mm de diâmetro, aumentando o espaçamento dos entalhes em 5mm aproximadamente. 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 77 – Utilização da máquina de tupia.



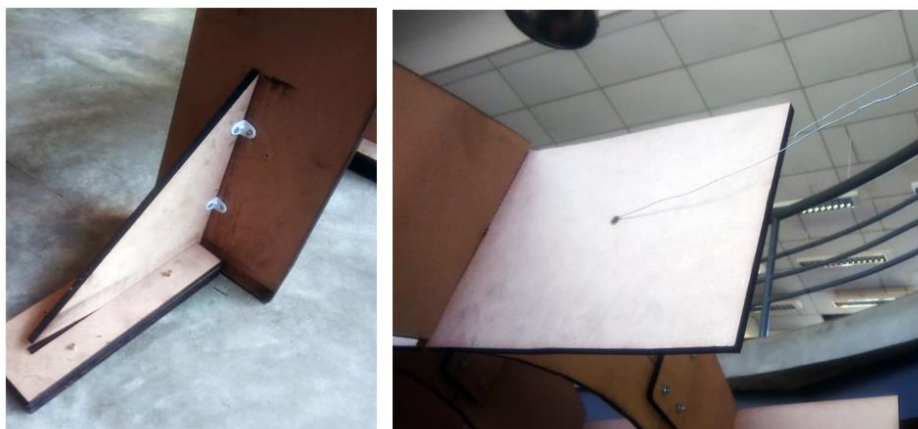
Fonte: acervo próprio.

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. Foram também redesenhadas as sapatas fixadas nas bases, adquirindo uma forma triangular, com o intuito de prevenir o deslocamento da estrutura para frente ou para trás. Esse deslocamento é resultante de um centro de massa que corta a estrutura transversalmente, do ponto mais alto da estrutura ao ponto mais baixo, concentrado o peso neste ponto devido à sua forma orgânica. A solução adotada foi a de “atirantar” a estrutura, com a colocação de arame fixo na peça “Y6”, com um empuxo no vetor



contrário a essa força transversal cortante à estrutura, proporcionando, assim, uma maior estabilidade e impedindo que ela se inclinasse para trás.

Figura 78 – Detalhe da sapata triangular e do “atirantamento”.



Fonte: acervo próprio.

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.

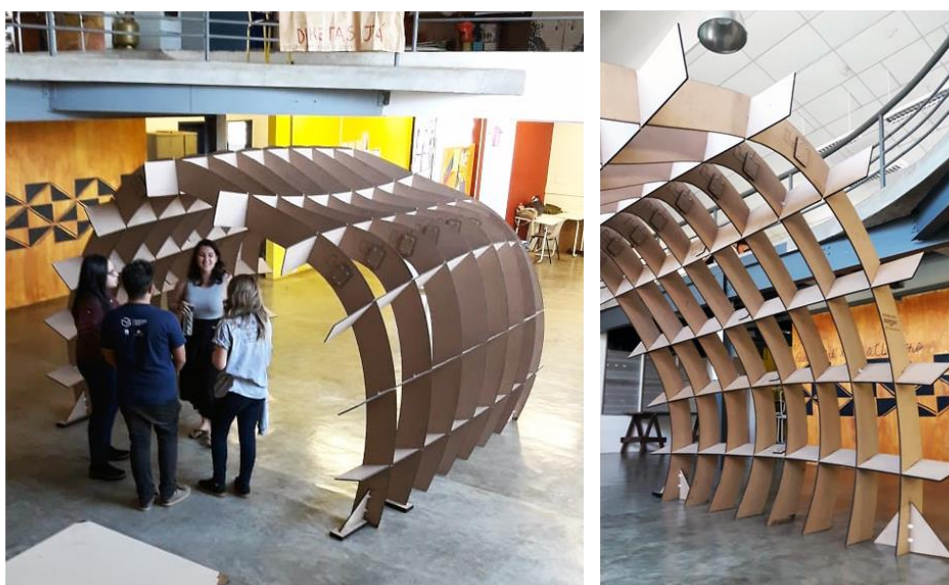
Figura 79 – Pavilhão Waffle Workshop etapa 2.



Fonte: acervo próprio.



Figura 80 – Pavilhão Waffle Workshop etapa 2



Fonte: acervo próprio.

#### 4.4 CONCLUSÕES DO 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 deve-se considerar 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.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Esta seção apresenta conclusões obtidas durante o trabalho, que teve como objetivo a realização um estudo exploratório e prático sobre o uso do *design* computacional em processos de projeto na atualidade, além de estudar a influência do uso de ferramentas digitais na relação com a temática dos princípios da evolução de tectônicas em arquitetura.

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.

A abordagem prática através da criação de experimentos foi fundamental para a validação e compreensão dos conceitos apresentados durante o trabalho. A reflexão sobre essa exploração empírica permitiu que dados ocultos pelo conhecimento tácito fossem revelados e analisados, gerando pontos que realizaram argumentações e permitissem o exercício da prática de projeto com enfoque neste tipo de pesquisa e *design*.

Dentro do trabalho realizado, foi possível perceber a potencialidade da ferramenta da programação aplicada a arquitetura. Sua versatilidade vai de encontro as necessidades atuais nas diversas áreas de projeto que cada vez mais exigem instrumentos especializados e customizáveis.

Como descrito no capítulo quatro, a programação influencia o processo de design se integrando ao ciclo do desenvolvimento de toda a sequência de ações de forma sempre reflexiva. Este diálogo foi observado principalmente durante a realização dos experimentos, visto que as soluções foram criadas a partir de resultados obtidos em um processo de caráter emergente e experimental.

A ideia era integrar os processos teóricos com os de produção e desenvolvimento de métodos, com a finalidade de incorporar aspectos de realização na geração de formas que os traduzem. Em particular no que diz respeito às ferramentas digitais necessárias para gerar desenhos e informações para produção digital, materializando-se assim nas tectônicas digitais aqui faladas.

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.

## **DESDOBRAMENTOS E TRABALHOS FUTUROS**

Observando-se o conteúdo abordado nesta dissertação, podemos presumir como futuros desdobramentos ou trabalhos futuros referentes a esta investigação:

- a) A ampliação e a exploração de outros conceitos dentro do conceito de tectônica digital, como por exemplo: tecnologias emergentes, internet das coisas, tectônicas sensíveis, etc;
- b) A concepção, simulação e construção de outros objetos partindo de outras lógicas de construção, adotando outras características, materiais e processos de projeto e fabricação.
- c) O uso de algoritmos genéticos, de otimização não linear de estruturas, técnicas de design biomórficas e outros métodos alternativos de geração de geometrias.
- d) O estudo e o levantamento dentro do ramo efetivo do setor de construção civil, as principais dificuldades de implementação, causas e aplicações dentro do cenário nacional.

Pode-se desenvolver como possíveis desdobramentos tendo como principal enfoque, aumentar a qualidade espacial e a viabilidade do ambiente construído através do desenvolvimento de uma mentalidade tectônica, incluindo teoria, métodos e modelos aplicáveis na concepção de princípios técnicos como gestos espaciais na pesquisa, educação e prática de arquitetura.

## REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, C. **Notes on the synthesis of form**. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1964.
- AL-HADDAD, T. **Precise Parametric Permutations**. UTFSM, 2009.
- ANDERSSON, I.K; KIRKEGAARD, P. H. **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.
- AURENHAMMER, F. **Voronoi Diagrams - A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure**. ACM Computing Surveys, 23(3):345-405, 1991.
- BEESELEY, P., SEEBOHM, T.; **Digital Tectonic Design**, Presented at eCAADe Conference, Hannover, University of Waterloo, 2000.
- BEESELEY, 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 (Germany) 22-24, 2000.
- BEIM, A., **Tectonic Visions in Architecture**. Copenhagen; the Royal Danish Academy of Fine Arts, School of Architecture Publishers, 2004.
- BOHNACKER, H. **Generative design: visualize, program, and create with processing**. New York: Princeton Architectural Press, 2012.
- BUSWELL, R. A.; SOAR, R.C.; GIBB, A. G. F.; THORPE, A. **Freeform construction: Megascale rapid manufacturing for construction**. In Automation in Construction, 16 (2), Pp. 224-231.doi: 10.1016/j.autcon.2006.05.002, 2007.
- CELANI, G.; CYPRIANO D.; GODOY G.; VAZ C.E., **A gramática da forma como metodologia de análise e síntese em arquitetura**, Conexão (Caxias do Sul), v. 5. 2006.
- CELANI, G.; PUPO, R. **Prototipagem Rápida e Fabricação Digital para arquitetura e construção: Definições e estado da arte no Brasil**. São Paulo: Caderno de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2008.
- CELANI, M. G. C.; Vaz, C. E. V. **Scripts em CAD e ambientes de programação visual para modelagem paramétrica: uma comparação do ponto de vista pedagógico**. In: Anais do V TIC, Salvador. Anais do V TIC, 2011. p. 1-13, 2011.
- COHEN, P. S. **Contested Symmetries: The Architecture and Writings of Preston Scott Cohen**. Princeton Architectural Press, New York, 2004.

CORTADA, J. W. **Before the Computer** – IBM, NCR, Burroughs, and Remington Rand and the Industry They Created, 1865 – 1956. [s.l.] Princeton University Press p.350, 1993.

CHRISTIANSEN, K., **The latter approach is the approach taken by our platform: Digital Tectonics**, Copenhagen, 2015.

CHRISTIANSEN, K., BECH-DANIELSEN, C.; BEIM, A.; **Tectonic thinking in Architecture**, Royal Danish Academy of Fine Arts, School of architecture, Denmark, 2012.

DANA, J. **On the Drawing of Figures of Crystals**. The American Journal of Science and Art. v. 32. p. 30-50, 1837.

DAVIS, D. **A History of Parametric**. Disponível em: <>. Acesso realizado em: 10/08/2017.

DA SILVA, J. T.; FARBIARZ, J. L. **O pensamento de Buckminster Fuller e o LILD**; PUC-Rio. 2016. Disponível em: <<http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/designproceedings/ped2016/0170.pdf>>. Acesso em 11 Fevereiro de 2018.

DENCKER, Ada de Freitas Manetti. **Métodos e Técnicas de Pesquisa em Turismo**. São Paulo: Editora Futura: 2003, 286p.

DENCKER, Ada de Freitas Manetti. DA VIÁ, Sarah Chucid. **Pesquisa Empírica em Ciências Humanas** (Com ênfase em comunicação). São Paulo: Editora Futura: 2008, 190p.

DUARTE, J. P. **Customizing mass housing**: a discursive grammar for Siza's Malagueira houses. [s.l.] Massachusetts Institute of Technology, 2001.

EISENMAN, P. **The formal basis of modern architecture**, Tese de doutorado, 378 p., Universidade de Cambridge, 1963.

ERIOLI, A.; **Aesthetics of Decision**: Unfolding the design process within a framework of complexity and self- organization,; CAAD EDUCATION | Design Concepts & Strategies - Volume 1 - eCAADe 34 | 219 – 228; 2016.

FIAMMA, P. **Architecture...from Generative Design**. DISEGNARECON, ISSN 1828-5961, 2011. Disponível em: <<https://goo.gl/JfzbvK>>. Acesso em: 02 ago. 2017.

FISCHER, T.; HERR, C. M. **Teaching generative design**, In: *Proceedings of the 4th International Generative Art Conference*. Milão: Ed. SODDU, 2001.

FRAMPTON, K. **Studies in a Tectonic Culture**: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture, (Edited by John Cava), MIT Press, Cambridge Massachusetts, 1995.

FRAMPTON, K. **“História Crítica da Arquitetura Moderna”**. São Paulo: Editora Martins Fontes, 1997.

FRASCARI, M., “**The Tell-the-Tale Detail**”. In: VIA 7 The Building of Architecture. Architectural Journal of the Graduate School of Fine Arts. University of Pennsylvania, 1984.

FULLER, R.B and MARKS, R.: **The Dymaxion World of Buckminster Fuller**, Anchor Books, Garden City, New York, 1973.

GOLAŃSKI; M. **Digital tectonics and dynamics in designing of wooden architecture envelopes**; Conference: 11th Conference on Advanced Building Skins; 2018.

HARTOONIAN, G. **Ontology Construction – On Nihilism of Technology in Theories of Modern Architecture**, Cambridge University Press, Cambridge, 1994

HEIDEGGER, M., (Translation by J. M. Lambert), **Kunstværkets Oprindelse**, Gyldendal, 1994.

HERNANDEZ, C. R. B. **Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi**. Design Studies: v. 27, n. 3, 2006.

HENRIQUES, G. C., DUARTE, J. P., FONSECA, J.O. **Sistema integrado para otimizar a iluminação natural num espaço circunscrito**, Congresso SiGraDi 2009 "Do Moderno ao Digital: Desafios de uma Transição" pág 107 – 109; 2009.

HENRIQUES, G.C. **TetraScript: Sistema de Aberturas Responsivo para Controlar a Luz, de acordo com fatores externos e internos**. Tese de doutorado, 448 p., Universidade Técnica de Lisboa, 2013.

IWAMOTO, L. **Digital Fabrications - Architecture and Material Techniques**. Princeton Architectural Press, 2009.

JABI, W., **Digital Tectonics: the intersection of the physical and the virtual**, Fabrication: Examining the Digital Practice of Architecture. Proceedings of the 23rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture and the 2004 Conference of the AIA Technology in Architectural Practice Knowledge Community, Cambridge (Ontario) 8-14 November, 2004.

JAMESON, F., **The Constraints of Postmodernism**, in ed. Leach, Neil, Rethinking Architecture, A reader in cultural theory, Routledge, Great Britain, 1997.

KHABAZI, Z. **Generative Algorithms using Grasshopper**. Zubin Mohamed Khabazi, 2010.

KLINGER, K. **Information Exchange in Digitally Driven Architecture**. Sigradi 2007: Sociedade ibero-americana de gráfica digital. Anais...Cidade do México: 2007.

KLINGER, K.; KOLAREVIC, B. “**Manufacturing / Material / Effects**”, **Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture**, New York, Routledge, pp. 5-24, 2008.



KIERAN S. AND TIMBERLAKE J., **Refabricating Architecture**, How Manufacturing Methodologies Are Poised to Transform Building Construction, Ed. McGraw-Hill: New York, 2004.

KOLAREVIC, B. **Digital Fabrication: From digital to material**. SIGRADI Conferences, 2000.

KOLAREVIC, B. **Designing and manufacturing architecture in the digital age**. Architectural information management. 2001.

KOLAREVIC, B. **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing**. Abingdom, Oxon: Taylor & Frances, 2005.

KOZA, J.R., **Genetic Programming: On the programming of computers by means of natural selection**, 1st edition, Cambridge, The MIT Press, p. 18, 1992.

KVAN, T., KOLAREVIC, B.: **Rapid prototyping and its application in architectural design**, Automation in Construction, 11, 277–278, 2002.

LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES, J. V.; **Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção**; Gest. Prod., São Carlos, v. 20, n. 4, p. 741-761, 2013.

LEACH, N., **Digital Tectonics**; John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, 2004.

LIMA, F.; MORAIS, V., **Relações histórico-conceituais entre representação e projeto: de Alberti à plataforma BIM de trabalho, da abstração ao modelo de informação**. In: Seminário Internacional Representar Brasil: As Representações na Arquitetura, Urbanismo e Design., 2013.

LYNN G.: **Folding in Architecture**. Academy Press, 2004.

MAEDA, J. **Design by Numbers**. Boston – MA: MIT Press, p. 256; 2001.

MCCULLOGH, M. **20 Years of Scripted Space**. Architectural Design, v. 76, n. 4, p. 12-15, 2006.

MITCHELL, W. **A lógica da arquitetura**. São Paulo: Editora da Unicamp, 2008.

MONEDERO, J. **Parametric design: a review and some experiences**. Automation in Construction: v.9, p. 369-377. 2000.

NARDELLI, E. S. **Arquitetura e projeto na era digital**. Arquiteturarevista, 2007.

NETO, W.B.; CELANI, G., CARVALHO, G.; ARAÚJO, A; **Samba Reception Desk: Compromising Aesthetics, Fabrication and Structural Performance With the Use of Virtual and Physical Models in the Design Process**. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v9i2.83913>, 2014.

OXMAN, R. & OXMAN, R. (eds) 2014, **Theories of the Digital in Architecture**, Routledge, U.K.

OXMAN, R. **Theory and design in the first digital age**. *Design Studies*, 27, p. 229-265, 2006.

OXMAN, N. **Material Computation**. In: BARCELONA, D. H. (Ed.). **FABVOLUTION**. [s.l.] Barcelona City, 2012.

OXMAN, R., **'Introduction: Vitruvius Digitalis'**, in *Anonymous Theories of the Digital in Architecture* (London; New York: Routledge), pp. 1-10, 2014.

OXMAN, R., **New structuralism: design**, engineering and architectural technologies. In *Architectural Design*, 80 (4). Pp. 14-23, 2010.

PUPO, R.; CELANI, G. **Técnicas de Prototipagem Digital**. Grafica 09. Anais...2009.

REAS, C.; LUST. **Form+code in design, art, and architecture**. 1st ed ed. New York: Princeton Architectural Press, 2010.

ROCKER, I., **When code matters**. *Architectural Design*, 76, 16-25, 2006.

ROESCH, Sylvia Maria Azevedo. FERNANDES, Francisco. **Como Escrever Casos para o Ensino de Administração**. São Paulo: Editora Atlas, 2007, 159p.

SCHMITT, G. **Information Architecture: basis and Future of CAAD**. Basel,Boston,Berlin: Birkauer, (The IT Revolution in Architecture); 93p.1999.

SCHUMACHER, P.; **Parametricism as Style-Parametricist Manifesto**. 11th Architectural Biennale, Venice. p. 1-7, 2008.

SCHUMACHER., P.; **Tectonism in Architecture, Design and Fashion: Innovations in Digital Fabrication as Stylistic Drivers**; April 2017;*Architectural Design* 87(6):106-113;DOI: 10.1002/ad.2245; 2017.

SCHWAB, K.; **The Fourth Industrial Revolution: What it Means and How to Respond**. Snapshot, December 12, 2015.

SEKLER, E. F., **Structure, Construction, Tectonics**, in ed. Kepes, Gyorgy, *Structure in Art and Science*, Studio Vista, London, 1965.

SEMPER, G., **Die Vier Elemente der Baukunst**. Ein Beitrag zur Vergleichenden Baukunde. Braunschweig, Friedrich Vieweg und Son, 1851.

SIMON, H. A. **The Sciences of the Artificial**. 3rd ed. Cambridge: MIT Press, 1996.

SOMOL, R. E. **Dummy Text, or The Diagrammatic Basis of Contemporary Architecture**. *Risco*, v. 5, n.1, p. 168-178, 2007.

STABILE, H. **Entre o Físico e o Digital** – Processos Paramétricos, de Interação e de Fabricação Digital Aplicados ao Design. Dissertação Mestrado, USP, São Paulo 2015.

SEKLER, E. F., **Structure, Construction, Tectonics**, in ed. Kepes, Gyorgy, Structure in Art and Science, Studio Vista, London, 1965.

SPEAKS, M. **Design Intelligence and the new economy**. Architectural Record. v.190, p.72, 2002.

SNOOKS, R, '**Volatile Formation**', in Davidson, C and Roche, F (eds) 2012, Log n. 25: Reclaim Resi[lience]stance//.....R2, Anyone Corporation, New York, pp. 55-62; 2012.

SZALAPAJ, P. **CAD: Principles for Architectural Design**. Architecture Week, 2001.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S.D. **Product Design and Development**. London:McGraw - Hill, 2000.

TERZIDIS, K. **Algorithmic Architecture**. Burlington – MA: Elsevier Ltd, 2006. V. 1p. 159

VELOSO, P.L., **Modelagem Digital na Arquitetura Contemporânea: por uma abordagem crítica e conceitual** – Anais do Congresso ENANPARQ, Rio de Janeiro, 2010.

VICENT, C. "**Projeto Arquitetônico e Computação Gráfica: Processos, Métodos e Ensino**". Anais do VIII Congresso Ibero-Americano de Gráfica Digital. São Leopoldo, Rio Grande do Sul, UNISINOS, 2004, p 89-90.

VIEIRA, A.K.; **Design generativo** – estudo exploratório sobre o uso de programação no design. USP, Trabalho de Conclusão de Curso; 2014.

WOODBURY, R 2010, **Elements of Parametric Design**, Routledge, N.Y

YU-T.L & CHOR-K.L., **New tectonics: a preliminary framework involving classic and digital thinking**. Design Studies 27(3), 2006.

YEHUDA, K.E., "**Architecture's New Media: Principles, Theories, and Methods of Computer-Aided Design**", 25, 2004.

<http://www.parametriccamp.com/en/>