



PGDESIGN | Programa de Pós-Graduação
Mestrado | Doutorado



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN**

Rafael Jeí Fuhr Puig

**O DIGITAL E O REGIONAL NA TEORIA DA TECTÔNICA:
UM ESTUDO DE ADAPTAÇÃO DOS PROCESSOS FORMATIVOS
DA TECTÔNICA DIGITAL AOS CONTEXTOS REGIONAIS**

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2021

RAFAEL JEÍ FUHR PUIG

**O digital e o regional na teoria da tectônica:
um estudo de adaptação dos processos formativos
da tectônica digital aos contextos regionais**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Underléa Miotto Bruscato

Coorientador: Prof. Dr. Júlio Carlos de Souza van der Linden

Porto Alegre

2021

CIP - Catalogação da Publicação

Puig, Rafael

O DIGITAL E O REGIONAL NA TEORIA DA TECTÔNICA: UM ESTUDO DE ADAPTAÇÃO DOS PROCESSOS FORMATIVOS DA TECTÔNICA DIGITAL AOS CONTEXTOS REGIONAIS / Rafael Puig. -- 2021.

111 f.

Orientadora: Underléa Bruscato.

Coorientador: Júlio Carlos Van der Linden.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. Tectônica. 2. Tectônica digital. 3. Design digital. 4. Fabricação digital. 5. Regionalismo. I. Bruscato, Underléa, orient. II. Van der Linden, Júlio Carlos, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo autor.

PUIG, F. J. Rafael. **O digital e o regional na teoria da tectônica**: Um estudo de adaptação dos processos formativos da tectônica digital aos contextos regionais. 2021. 111 f. Dissertação de Mestrado em Design – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

Rafael Jeí Fuhr Puig

**O DIGITAL E O REGIONAL NA TEORIA DA TECTÔNICA:
UM ESTUDO DE ADAPTAÇÃO DOS PROCESSOS FORMATIVOS
DA TECTÔNICA DIGITAL AOS CONTEXTOS REGIONAIS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre/Doutor em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 04 de março de 2021.

Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

Banca Examinadora:

Orientador: **Profª. Drª. Underléa Miotto Bruscato**

Departamento de Arquitetura – Orientadora

Prof. Dr. Júlio Carlos de Souza van der Linden

Departamento de Design na Expressão Gráfica – Coorientador

Profª. Drª. Alessandra Teribeli

Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Examinadora Externa

Profª. Drª. Clarissa de Oliveira Pereira

Universidade Franciscana – Examinadora Externa

Prof. Dr. Renato Vaz Linn

Departamento de Engenharia Civil – Examinador Interno

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que estiveram presentes durante o período de elaboração deste trabalho e que contribuíram para a sua conclusão de forma direta ou indireta.

Em especial, agradeço à Nathália Dalla Valle pelo seu apoio incondicional e compreensão nos tempos difíceis, bem como pelo amor e pela parceria que permeiam minha vida nos últimos anos e que acompanharam esta dissertação.

À minha orientadora pelo incentivo, apontamentos, conselhos e coleguismo que se fizeram presentes mesmo quando estava do outro lado do oceano, fundamentais para manter o empenho e dedicação. Bem como ao meu coorientador pela sua alegria contagiante e constante incentivo e inspiração.

Aos colegas que fizeram parte dessa caminhada, principalmente a Cauê Costa, Eduardo Cabral, Fernanda Serrate e Marina Pires, pelo aprendizado mútuo que enriqueceu minha passagem na pós-graduação e a este trabalho. Em especial um agradecimento ao Fernando Ferreira, que me acudiu nos momentos finais desta dissertação com muito brilhantismo.

À professora Angélica Ponzio por oportunizar, junto de minha orientadora, a experiência junto à docência que renovaram meu sentido de propósito no mestrado.

Aos meus pais, Nádia e Hélios, que me apoiaram quando eu mesmo não o consegui fazê-lo, auxiliando na busca pelos meus sonhos e tornando esta dissertação possível.

Por fim agradeço à UFRGS, que, apesar de todas as adversidades, oferece um ensino público de excelência, e, em especial, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), principal mantenedora dos programas de pós-graduação.

RESUMO

PUIG, F. J. Rafael. **O digital e o regional na teoria da tectônica**: Um estudo de adaptação dos processos formativos da tectônica digital aos contextos regionais. 2021. 96 f. Dissertação de Mestrado em Design – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

Este estudo visa a compreensão da reprodução de características culturais regionais próprias da construção vernacular perpetuados através do emprego das tecnologias digitais na produção de elementos tectônicos contemporâneos. A partir de uma revisão narrativa de literatura acerca da teoria da tectônica, identificaram-se tanto os fatores indutores do “caráter local” na tectônica, bem como os elementos formativos próprios da tectônica digital - baseados na morfogênese digital - a partir dos quais foi possível compreender como os mesmos podem interagir na formação de elementos tectônicos contemporâneos, produzidos através das tecnologias digitais, do design digital e da fabricação digital, e identificados com características regionais. A partir dessa compreensão, foram apresentadas estratégias de design que reproduzem essa integração entre o digital e o regional, demonstrando como os processos formativos da morfogênese digital podem ser orientados por parâmetros culturais, resultando em explorações tectônicas representativas da associação entre o estado da arte tecnológico e aspectos simbólicos culturais.

Palavras-chave: design digital, fabricação digital, morfogênese digital, tectônica digital, vernacular.

ABSTRACT

PUIG, F. J. Rafael. **O digital e o regional na teoria da tectônica:** Um estudo de adaptação dos processos formativos da tectônica digital aos contextos regionais. 2021. 96 f. Dissertação de Mestrado em Design – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

This study aims to understand the reproduction of regional cultural characteristics, typical of vernacular construction, through the production of contemporary tectonic elements by the aid of digital technologies. From a narrative literature review on the tectonics theory, both factors inducing the “local character” in tectonics, as well as the formative elements of digital tectonics, were identified. This made possible the understanding the relationship of both factors in the formation of contemporary tectonic elements, produced through the digital technologies of digital design and digital fabrication, and regarding regional characteristics. From this understanding, some design strategies that reproduce this integration between digital and regional were demonstrated, showing how the formative processes of digital tectonics, “digital morphogenesis”, can be guided by cultural parameters, resulting in tectonic explorations representing an association between state of the art and technology and symbolic cultural aspects.

Keywords: Digital tectonics, digital design, digital fabrication, digital morphogenesis, Vernacular.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas da pesquisa.....	19
Figura 2 – Estudo de Bötticher a respeito dos ornamentos dóricos	25
Figura 3 – Representação da cabana primitiva caraíba	28
Figura 4 – Ilustração de artefatos produzidos por diversas culturas	29
Figura 5 – Ilustração de jarras antigas	30
Figura 6 – Malha suspensa e modelo da estrutura de uma membrana	33
Figura 7 – “Empatia” em diferentes sistemas construtivos.....	34
Figura 8 – Interior da câmara do conselho da Prefeitura Municipal de Säynätsalo...36	
Figura 9 – Modelo 3D do caça francês “Mirage”, produzido pelo software “CATIA”386	
Figura 10 – Modelo 3D do Guggenheim Bilbao	37
Figura 11 – Museu Guggenheim de Bilbao, projeto do arquiteto Frank Gehry	38
Figura 12 – Pavilhão do Canadá, para a Bienal de Veneza, em 2010.....	41
Figura 13 – Instalação “Swarm Tectonics”	42
Figura 14 – Fatores tectônicos digitais.....	44
Figura 15 – Princípios estruturais inspirados em técnicas vernaculares	46
Figura 16 – Cadeira e jaqueta produzida por Schumacher e Zivanic.....	47
Figura 17 – Instalação “Candela revisitado”, para a Bienal de 2013.....	48
Figura 18 – Projeto do centro cultural Qingdao por Zaha Hadid Arquitetos	48
Figura 19 – Projeto “In Bamboo”, de ARCHI-UNION	49
Figura 20 – Fabricação robótica inspirada no vernacular.....	50
Figura 21 – Linha do tempo da teoria da tectônica	49
Figura 22 – Diagrama conceitual da tectônica tradicional.....	53
Figura 23 – Diagrama conceitual da Morfogênese digital	58
Figura 24 – Diagrama conceitual da tectônica digital	57
Figura 25 – Seção Ilustrativa da estrutura do telhado tradicional chinês	62
Figura 26 – Telhado tradicional chinês da dinastia Qing.....	63
Figura 27 – Diagrama estrutural e cálculo do momento fletor.....	64
Figura 28 – Modelo simplificado para simulação do beiral.....	65
Figura 29 – Condição de equilíbrio da estrutura	64
Figura 30 – Processo de geração de uma unidade	65
Figura 31 – Unidade básica e modelo de simulação	65
Figura 32 – Simulação da performance estrutural com o Milipede.....	68
Figura 33 – Fresagem das hastes em fresadora CNC de 5 eixos.....	69
Figura 34 – Classificação das hastes e conexão	70
Figura 35 – Instalação finalizada.....	70
Figura 36 – Estrutura da tenda tradicional mongol.....	71
Figura 37 – Maquete de estudos de Frei Otto	720
Figura 38 – Geração das linhas de curvatura.....	72
Figura 39 – Processo de otimização da malha estrutural	73
Figura 40 – Análise computacional comparativa da curvatura da <i>gridshell</i>	73
Figura 41 – Simulação estrutural e processo de otimização	74

Figura 42 – Sistema estrutural da Gridshell após a otimização	75
Figura 43 – Sistema das juntas em camada dupla	76
Figura 44 – Diagramação das ripas e processo de usinagem das mesmas	76
Figura 45 – Processo de produção das vigas de borda	79
Figura 46 – Corte robótico e modelo de simulação dos movimentos do robô	78
Figura 47 - Corte robótico com serra em fita acoplada em funcionamento	80
Figura 48 – Pavilhão finalizado	79
Figura 49 – Fotografia de um exemplar da casa “Kamayurá”	831
Figura 50 – Conceito arquitetônico	82
Figura 51 – Definição das diferentes funções da membrana	83
Figura 52 - Definição da configuração material da membrana	84
Figura 53 – Pré-tratamento do material empregado.....	84
Figura 54 – Teste empírico do ponto máximo de curvatura do material	85
Figura 55 – Processo de exploração da forma da viga de borda	87
Figura 56 – Processo de conformação da sintaxe da membrana	88
Figura 57 – Modelo digital final da instalação.....	891
Figura 58 – Etiquetagem digital das hastes que compõe a trama da instalação	89
Figura 59 – Amarração das conexões, utilizando cordão de juta natural	90
Figura 60 – Lógica de inserção e conexão das ripas	920
Figura 61 – Instalação finalizada.....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Descrição das abordagens, parâmetros e técnicas aplicadas.....	99
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	16
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo geral	16
1.3.2 Objetivos específicos	16
1.4 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	16
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	18
1.5.1 Revisão narrativa de literatura	19
1.5.2 Estudo de casos múltiplos	20
2 TEORIA DA TECTÔNICA	22
2.1 ORIGEM E ETIMOLOGIA	22
2.2 OS TRATADOS DA CONSTRUÇÃO ENTRE OS SÉCULOS XV E XVIII	23
2.3 O DEBATE ALEMÃO NO SÉCULO XVIII	24
2.4 A RETOMADA DA TECTÔNICA NO SÉCULO XX	32
2.5 A "TECTÔNICA DIGITAL" NO SÉCULO XXI	37
2.6 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO II.....	51
3 UMA SÍNTESE ENTRE O TRADICIONAL E O DIGITAL	53
3.1 O "CARÁTER LOCAL" NA TECTÔNICA TRADICIONAL	53
3.2 A "FORMAÇÃO" NA TECTÔNICA DIGITAL	56
3.3 UMA SÍNTESE ENTRE O "LOCAL" E O "DIGITAL"	59
3.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO 3	60
4 ESTUDOS DE CASO	61
4.1 REVERSE RAFTER	62
4.2 GRIDSHELL	71
4.3 COMPUTATIONAL BAMBOO	81
4.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO 4.....	93
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	95
6 CONCLUSÃO	101
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ..	103
RECONHECIMENTOS	105
REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

O termo “vernacular” vem da palavra “*vernaculus*” ou “*vernaculas*”, do Latim, que significa “nativo”. Trata das construções humanas resultantes das interrelações entre os fatores da vida local em termos de ecologia, economia, materiais, política e relações sociais (RAPOPORT, 1969; OLIVER, 1997). As construções vernaculares são produtos dos costumes de um povo, na utilização dos materiais disponíveis em sua região, a partir de conhecimentos construtivos transmitidos pelas gerações através das tradições. Por este motivo, a Arquitetura Vernacular é considerada uma expressão direta das necessidades práticas e espirituais de uma comunidade, representando sua visão de mundo e seu sistema de valores (OLIVER, 1997).

A partir da Revolução Industrial, iniciada na metade do século XVIII, a produção baseada na tradição artesanal é substituída, gradativamente, pela mecanização dos sistemas de produção, possibilitando, através da produção em massa, atender à demanda crescente da população (SANTOS, 2016). Nesse contexto, o movimento Moderno explorou, com sucesso, a incorporação de pré-fabricados nos métodos construtivos, tornando as edificações um produto consumível pelas massas (TIMBERLAKE, 2003). Como consequência, foi necessário um processo de regulação e normatização dos sistemas construtivos e ocorreu uma padronização das necessidades e aspirações dos consumidores. Desta forma, padronizando a produção do ambiente construído, foi criada uma estética industrial de caráter “universal”, ou seja, não mais associada ao contexto sociocultural local presente na produção artesanal que caracteriza o senso e significado do “local” nas edificações (SANTOS, 2016).

Como contraponto a este processo, Kenneth Frampton buscou explicar como os princípios de produção vernaculares poderiam auxiliar na condução do design de artefatos arquitetônicos, em concordância com seu contexto regional, agregando uma dimensão cultural e significado de pertencimento aos mesmos (FRAMPTON, 2015). Utilizou, para isto, o conceito da tectônica que exprime uma perspectiva de integração entre forma, material, estrutura e construção existente no processo formativo das edificações vernaculares.

Para Frampton (2015), a articulação, entre os elementos arquitetônicos, os materiais e a sua configuração, tem um papel fundamental na narração da lógica conceitual do design arquitetônico: desde a concepção das edificações até sua fabricação e montagem. Assim, os materiais, tecnologias e técnicas disponíveis são traduzidos como a tectônica do objeto em si (FRAMPTON, 2015). Entretanto, o autor ainda observa que a abordagem tectônica perpassa a simples escolha de um sistema de construção e deve ser operada como uma dimensão poética da construção. Indica que isto é expresso a partir de variáveis que pressupõem uma ligação íntima entre a concepção da materialidade e da estrutura com a do seu significado, constituindo o núcleo do pensamento tectônico. Logo, a partir da compreensão das potencialidades materiais e dos métodos construtivos, os processos de materialização das edificações e sua expressão simbólica são unificados (FRAMPTON, 2015).

Na virada do século XX para, o XXI, as tecnologias emergentes da Era Digital, especialmente o design digital e a fabricação digital, passaram a aliar adaptabilidade e flexibilidade à produção em série, possibilitando uma “customização em massa”, e, com ela, a transição da sociedade da Era Industrial para a Era Digital (MITCHELL, 1990). Este advento pontuou uma “quebra de paradigma”, na cultura de design e fabricação, permitindo a produção de edificações melhor adaptadas ao contexto no qual se inserem, a partir da produção de formas complexas através da capacidade das ferramentas, do design e da fabricação digitais, de geração, análise, otimização, fabricação e montagem (KOLAREVIC, 2003b).

Nesse contexto, a tectônica ganhou, naquele momento, relevância como um termo seminal e operativo de design. Deve-se isto a possibilidade dos computadores em mediar a integração entre forma, estrutura, material e construção, na formalização de padrões estruturais em meio digital, especialmente a partir do design e da fabricação digitais (KOLAREVIC, 2005). Frente a isto, diversos teóricos se propuseram a estudar o que viria a ser a tectônica digital (OXMAN, Rivka, 2010). A tectônica digital, passou, então, a ser utilizada, dentre outras interpretações, para explicar a capacidade dos processos formativos computacionais, estabelecendo-se como metodologia para a criação de “modelos tectônicos digitais”, configurando uma espécie de “artesanato digital” (OXMAN; OXMAN, 2010).

Patrick Schumacher (2014), inspirado no potencial das tecnologias digitais, idealizou o “Parametricismo”: uma nova linguagem, própria da Era Digital, constituindo, assim, um novo “estilo” arquitetônico. Este, segundo o autor, seria calcado no potencial de responsividade e adaptabilidade promovidas pelas tecnologias digitais (SCHUMACHER, 2014). Esta capacidade seria uma resposta à complexidade e ao dinamismo das interações sociais em uma sociedade digital. A esta possibilidade, a partir de modelos parametricamente maleáveis e responsivos às funções técnicas e sociais, em uma perspectiva sistêmica e ecológica, este autor cunhou de “articulação tectônica” (SCHUMACHER, 2014). Embora a adaptação seja o cerne do discurso no Parametricismo de Schumacher, assim como também o é para a tectônica de Frampton, ambas propostas, resguardam diferenças fundamentais.

A adaptação, referida por Schumacher, provém do mundo virtual e matemático, do potencial computacional e da complexidade emergentes das tecnologias digitais como a programação, a eletrônica e a automação. Portanto, reproduz a visão exata do computador, interpretando o ambiente construído como uma combinação de parâmetros de performance. Estes estão relacionados às forças ambientais e sociais, como ângulos solares, direção e intensidade do vento e fluxos populacionais. A perspectiva de Frampton, por outro lado, provém do mundo material, do senso de “lugar” da tradição vernacular. Dota o contexto de significados socioculturais que emergem de tipologias, materiais, mão de obra e técnicas de construção tradicionais (SURVANT; TALBOT, 2016).

1.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A partir da compreensão destes autores, em relação ao como o contexto deve orientar a formação das edificações, a presente pesquisa estuda a conciliação entre os aspectos “tectônicos” e “digitais” neste processo. Assim, pretende contribuir, sob o paradigma das tecnologias digitais, para o debate da produção de edificações mais bem adaptadas ao contexto no qual se inserem. Este contexto visto, não apenas através de parâmetros de performance de variáveis climáticas e ambientais, mas, em um senso mais amplo, resgatando, preservando e operando a dimensão simbólica atrelada aos aspectos socioculturais.

1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos: O primeiro tratou da introdução, apresentando a contextualização do tema, a questão de pesquisa, os seus objetivos e justificativa. No segundo capítulo, foi realizada a revisão narrativa de literatura que norteou o trabalho, desdobrando-se no desenvolvimento da pesquisa, no terceiro capítulo, seguido dos estudos de casos, no quarto capítulo. Em seguida, no quinto capítulo, é feita uma discussão dos resultados, seguida das conclusões da dissertação, no sexto capítulo. Por fim, no sétimo capítulo, são desenvolvidas as considerações finais e sugestões para os trabalhos futuros, respectivamente.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo da presente pesquisa é compreender como é possível orientar os aspectos formativos da tectônica digital para promover sua adaptação aos aspectos simbólicos, que exprimem o senso de “lugar” da tectônica tradicional, referentes às características socioculturais regionais.

1.3.2 Objetivos específicos

Com a finalidade de contemplar o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) identificar, a partir da teoria da tectônica tradicional, os aspectos que originam a “expressão do lugar”, associados à cultura regional.
- b) identificar, na teoria da tectônica digital, os aspectos que permitem a formação de modelos tectônicos a partir de seus princípios.
- c) compreender e descrever como os aspectos formativos da tectônica digital podem interagir com os aspectos simbólicos socioculturais da tectônica tradicional.

1.4 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O conceito de design, para Verganti e Dell’Era (2014), em um senso mais amplo, é que se trata de uma atividade através da qual se inovam os significados das coisas. Portanto, estes autores veem o design como um motor de inovação, preocupado em trazer novas perspectivas, em relação ao propósito do consumo de algo, em detrimento das explorações relativas às suas funcionalidades. Saliendam, ainda estes

autores, que o estilo é uma das muitas formas pelas quais se comunicam mensagens simbólicas e emocionais de consumo e que estas podem sofrer inovações tanto pela evolução do contexto sociocultural quanto pela emergência de novas tecnologias.

Estes preceitos a respeito do design e de sua dinâmica de consumo, centrados nos significados, figuram, também, no pensamento tectônico, como exposto por Frampton (1997). Muito embora essa questão possa parecer desconexa do universo do design, as edificações, desde o período moderno, são concebidas como produtos e, portanto, também compartilham deste racional. Logo, a mesma importância ressaltada por Verganti e Dell’Era (2014) para as dimensões estéticas e simbólicas do produto, representadas em seu estilo, são igualmente aplicáveis ao mercado e à indústria da construção, compartilhando a mesma relevância.

Indo ao encontro deste pressuposto, pode-se, ainda, afirmar que as inovações na indústria podem se valer da reinterpretação dos significados presentes em estilos antigos, os tornando novamente relevantes para a sociedade, de maneira que diversos produtos significativos são novas interpretações de linguagens já existentes no mercado (DELL’ERA; VERGANTI, 2007). Esta lógica é replicável para a indústria na construção, particularmente em elementos, sistemas e exemplares de edificações. Nesta dissertação, seus princípios formativos são debatidos através da relação entre tecnologia e elementos culturais na formação de significados, servindo de resgate e de reformulação dos valores imbuídos nestes frente à sociedade.

Concordando com o argumento apresentado, Hargadon e Sutton (1997) defendem que os designers são capazes de trabalhar a linguagem de design criando produtos com significados sem precedentes pela captura, recombinação e integração de conhecimento a respeito de modelos socioculturais e da semântica do produto em diferentes segmentos da indústria e da sociedade. Assim, completam os autores, de maneira similar às tecnologias disruptivas, os designers são capazes de transferir linguagens de produtos e significados através de diferentes indústrias, explorando possíveis conexões entre elas.

Por fim, a cultura, na qual as pessoas vivem, influencia a conexão entre a linguagem do produto e seu significado (LLOYD; SNELDERS, 2003). Isto indica que designers podem prover diferentes pontos de vista ao interpretarem se o significado do produto

combina tanto as dimensões sociais quanto as culturais das pessoas que vivem determinada localidade. Por outro lado, a partir do entendimento que tecnologia avançada é algo que vai além de soluções inovadoras universalizantes – muitas vezes importadas de outros contextos, é possível adotar práticas projetuais baseadas nas tradições artesanais como forma de responder a demandas contemporâneas, conciliando adaptabilidade ao contexto, interlocução com a comunidade e materiais e técnicas construtivas locais.

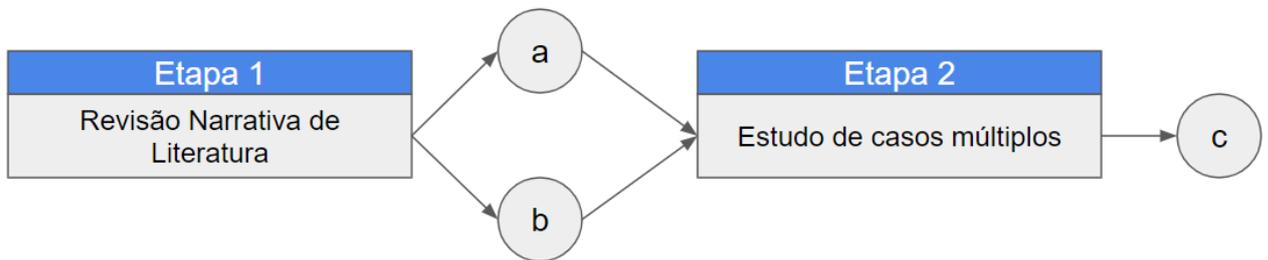
Logo, o estudo a respeito da conciliação dos aspectos tectônicos socioculturais, mais ligados com à tradição vernacular, e os digitais, representados nas técnicas contemporâneas de design e fabricação digitais, para a produção de novas soluções em design, tem, neste trabalho uma definição mais ampla. Perpassando a produção de qualquer indústria, tem sua importância tanto na produção de novos significados para a sociedade quanto em garantir que os meio de produção estejam de acordo com as diferenças regionais. Portanto, torna-se relevante, também, a compreensão de como adaptar, aos contextos culturais, os processos formativos capazes de gerar componentes, sistemas e elementos arquitetônicos.

A partir das novas tecnologias da era digital, a relevância citada renova-se ao passo que configura um novo e importante potencial de exploração. Além disso, torna-se, também, uma reflexão sobre uma agenda tecnopolítica do ambiente construído, na era digital, que oportuniza a apropriação do conteúdo teórico e prático do digital, a partir de visões regionais, de acordo com as suas necessidades e percepções de mundo, promovendo diversidade e inclusão no emprego e difusão dessas tecnologias.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A presente pesquisa está estruturada em duas etapas distintas e sequenciais. Iniciou, com uma revisão narrativa de literatura a respeito da teoria da tectônica, a partir da foram atingidos os objetivos específicos “a” e “b”. Na segunda etapa, foi realizado estudo de casos múltiplos relativos ao objetivo específico “c”, conforme a apresenta a figura 1.

Figura 1 – Etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

1.5.1 Revisão narrativa de literatura

A revisão narrativa da literatura focou na teoria da tectônica, explorando suas diferentes correntes teóricas: a tradicional, compreendida como aquela desenvolvida a partir do conteúdo teórico anterior à Era Digital, e, a digital, tratando daquela que se desenvolve a partir do conteúdo teórico atrelado ao desenvolvimento das tecnologias digitais. Ao contrário da revisão sistemática de literatura, a revisão narrativa não se utiliza de critérios explícitos e sistematizados para a busca de referências, pois não objetiva esgotar as fontes bibliográficas existentes. Apresenta-se como uma alternativa apropriada para discutir temas atualmente em desenvolvimento, sob perspectiva científica, através da análise da literatura publicada (ROTHER, 2007). Este método apresenta característica de amplitude, partindo de um problema em evolução, e não exige um protocolo rígido para a execução da pesquisa. Desta forma, a seleção de estudos não necessita de uma especificação e, sua avaliação, varia conforme percepção subjetiva do autor em síntese qualitativa (CORDEIRO et al., 2007; ROTHER, 2007).

Esta revisão narrativa sobre o tema da tectônica, explorou, inicialmente, a etimologia do termo e, em seguida, sobre o seu desenvolvimento teórico a partir de uma perspectiva histórica. Posteriormente, essas informações foram resumidas e comparadas, formando um processo de análise de dados em três fluxos simultâneos: condensação de dados, exibição de dados e desenho da conclusão (MILES et al., 2014). O desenho de conclusões diz respeito à interpretação contínua, desde o início da coleta de dados, do significado dado à tectônica por diversos autores ao longo dos períodos históricos, observando padrões, explicações, fluxos causais e proposições. Esta etapa buscou alcançar aos objetivos específicos “a” e “b”, propostos para esta pesquisa, nas vertentes teóricas tradicionais e digitais da tectônica, a partir da

compreensão dos fatores que determinam a expressão do “lugar”, bem como os elementos formativos da tectônica a partir das tecnologias digitais.

1.5.2 Estudo de casos múltiplos

Na segunda etapa, na forma de estudo de casos múltiplos, foram apresentados casos descritivos para ilustrar os tópicos encontrados na avaliação da tectônica na primeira etapa. Desta forma, foi atingido o objetivo específico “c” desta dissertação, que busca identificar e descrever como os fatores associados ao local, da tectônica tradicional, podem interagir com os processos formativos da tectônica digital.

O estudo de caso é um método de pesquisa que utiliza, geralmente, dados qualitativos, coletados a partir de eventos reais, com o objetivo de explicar, explorar ou descrever fenômenos atuais inseridos em seu próprio contexto. Caracteriza-se por ser um estudo detalhado e exaustivo de poucos, ou mesmo de um único objeto, fornecendo conhecimentos profundos (YIN, 2009). Apesar da impossibilidade de, a partir da análise de poucos casos, estabelecer generalizações, o estudo de caso ainda é considerado útil para investigar novos conceitos, bem como para verificar como são aplicados e utilizados na prática elementos de uma teoria (YIN, 2009).

Para a aplicação da metodologia, quanto ao número de casos, pode-se utilizar um caso único ou realizar o estudo de casos múltiplos. Os estudos múltiplos são considerados mais convincentes e robustos porque permitem, além da análise individual, a análise entre os casos. Enquanto as análises individuais consolidam as informações de cada caso; as análises entre os casos identificam padrões, fornecendo elementos para a construção de hipóteses e o desenvolvimento de teorias (EISENHARDT, 1989).

No presente trabalho, foi realizado um estudo de casos múltiplos, cuja seleção partiu de protótipos de sistemas construtivos não padronizados elaborados a partir de processos formativos em *form-finding*¹ digital, cujas premissas eram explorar parâmetros socioculturais característicos de diferentes localidades. Como critérios de seleção adicionais, os casos selecionados deveriam fazer parte de pesquisas

¹ “*Form-finding*” é uma técnica de design que se utiliza da auto-organização de sistemas materiais sob a influência de forças extrínsecas ou manipulações mecânicas. Em outras palavras, permite encontrar a forma de um material em determinado estado de equilíbrio em relação às suas forças internas e externas (MENGES, 2007).

científicas, devidamente documentadas em periódicos, publicadas após o ano de 2010. Como os resultados atingidos nos objetivos específicos “a” e “b” impactam, também, na seleção dos casos, informações adicionais sobre as escolhas são apresentadas no capítulo 3, imediatamente antes de sua apresentação.

2 TEORIA DA TECTÔNICA

Em seus primeiros tratamentos teóricos, o termo “tectônica” foi empregado para referir-se a uma perspectiva de integração entre forma, material, estrutura e construção na produção arquitetônica vernacular (OXMAN, 2006). Entretanto, assumiu, também, diversas outras conotações, a partir das obras de teóricos como Karl Bötticher, Gottfried Semper, Eduard Sekler e Kenneth Frampton. Desta forma, passa a servir de insumo para o debate de temas mais amplos, como as relações entre ética e estética na construção e das implicações do desenvolvimento científico, técnico e social de uma sociedade no seu ambiente construído. A esta aplicação da teoria da tectônica, a presente dissertação refere-se pelo termo “tectônica tradicional” (GAO, 2004), em detrimento da alcunha alternativa de “clássica” (LIU; LIM, 2006). A escola deve-se ao fato de remeter, com maior afinidade, a sua origem nas tradições construtivas da arquitetura “vernacular” – também conhecida por “tradicional”.

2.1 ORIGEM E ETIMOLOGIA

A tectônica é um tema recorrentemente debatido, no campo da Arquitetura, cuja afinidade com esse campo remonta da origem das palavras. O termo “tectônica” é uma adaptação do latim “*tectonicus*” e tem, como origem, do grego antigo “*tektonikós*”. Ambas as palavras significando algo “pertencente, ou do domínio, da construção”. O seu radical “*téktōn*”, faz referência ao “construtor, carpinteiro, marceneiro ou mestre em qualquer arte” (BALINSKI; JANUSZKIEWICZ, 2016) sendo, também, a origem do termo “arquiteto”: uma adaptação do latim “*architecton*” que se origina no grego antigo “*arkhitéktōn*” – o “mestre construtor” (FRAMPTON, 1995). Segundo este autor, os primeiros registros da palavra “*téktōn*” estão nos escritos de Homero e fariam alusão às artes da construção em geral. Em um segundo momento, o termo assumiria também uma conotação “poética”, transmitido nas obras do poeta Sappho, assumindo um senso de “saber fazer”, ainda que restrito ao ofício da carpintaria.

A partir do século V a.C., o termo assumiria uma forma mais geral, associando-se às ideias da “*poiesis*”, ou seja, atividades em que “o indivíduo cria algo ou a maneira de se fazer algo, que não existia anteriormente”. Dessa forma, a sua associação deixa de fazer alusão somente ao trabalho do carpinteiro e passa a se referir ao trabalho de

artesãos em geral. Um ponto interessante é a inflexão do significado de “arquitetura”: do embasamento na figura do construtor, para o um “sistema integrado de edificação”, particularmente a partir do século XIX. Assim, há uma inversão no caráter do termo: de “especializado” e “específico”, associado ao trabalho artesanal do “mestre construtor”, para “generalizado” e “universal”, associado a um “sistema integrado”. Isto caracteriza a transição do foco na “técnica” para o foco no “método” (OXMAN, 2009).

2.2 OS TRATADOS DA CONSTRUÇÃO ENTRE OS SÉCULOS XV E XVIII

Entre os séculos V a.C. e XV d.C., existem muitos avanços técnicos e teóricos relativos à construção os quais mereciam maior detalhamento nessa dissertação. Entretanto, devido a esta pesquisa não ter por objetivo exaurir a literatura a respeito dos aspectos mais amplos do tema da tectônica, optou-se por delimitar a revisão narrativa estritamente ao debate tectônico em meio documental. Mas, como no período citado a cultura da construção era perpetuada, ao menos no ocidente, por meio das tradições orais, acabaram por serem excluídas desta revisão. Assim, as contribuições mais importantes para a conformação da tectônica, após a criação do termo, começam com os tratados construtivos entre os séculos XV e XVIII.

Como apontado anteriormente, a palavra “tectônica” foi associada, no período clássico, ao “saber-fazer” relacionado aos ofícios artesanais, especialmente à carpintaria, representando uma síntese entre “técnica” e “arte”. Esta compreensão dos gregos antigos constitui a base do debate da tectônica, que se iniciaria na metade do século XVIII, fruto do iluminismo europeu (CANTALICE, 2015). Nesse meio tempo, salienta o autor, entre os séculos XV e XVIII, os debates referentes às maneiras de construir se resumiam a constituição de diferentes tratados sobre a construção – compêndios de regras de construção a partir de conhecimentos e técnicas construtivas – que estabeleciam um regramento moral do ato de construir.

Este processo teve seu auge no século XV, a partir da publicação “Sobre a arte de construir”, em 1452, de Leon Battista Alberti (1404-1472). É reconhecido como um tratado de importância seminal para o campo da arquitetura, marcando a sua diferenciação e dissociação do ofício da construção a partir da elaboração do projeto arquitetônico. Neste tratado, Alberti propõe a elaboração das edificações somente a partir da premissa do conhecimento das técnicas construtivas e materiais aplicados. Defende, também, uma hierarquização dos elementos da edificação, segmentados

entre primários, referentes aos elementos estruturais, e, secundários, às aberturas. As ideias de Alberti reforçam um princípio de racionalização e sistematização da construção e sugerem uma transição do foco na técnica do “saber fazer” do período clássico, para um foco na composição e no método (CANTALICE, 2015).

Por fim, no século XVIII, Marc-Antoine Laugier publica o “O Ensaio Sobre a Arquitetura” (1753), em que defende que a origem das construções e da arquitetura reside na interação primordial entre o ser humano e a natureza. Defende que, a partir do estudo das tipologias primitivas, seria possível extrair um modelo ideal para a construção humana, por se tratar da origem de todas as formas possíveis na arquitetura (LAUGIER, 1999 [1753]). Assim, propõe os princípios compositivos das construções primitivas como um modelo ideal, sendo essa dividida em três elementos hierárquicos: as partes essenciais, que correspondem ao frontão, entablamento e colunas; as partes de necessidade, relacionadas a janelas e elementos de fechamento; e as partes de “capricho”, que seriam os seus ornamentos (CANTALICE, 2015). Entretanto, esta divisão de Laugier corresponde aos elementos preponderantes na Arquitetura Neoclássica (frontão, entablamento e coluna), o que escancara uma intenção de moralizar a construção, apontando o classicismo como a maneira “correta” de construir, justificado por um “ideal natural” como alegoria (CANTALICE, 2015).

A diferenciação da arquitetura e da construção, a noção de uma composição projetual e o regramento moral do construir, fundamentado na Arquitetura Neoclássica, acenderam debate teórico a partir do século XVII. Debatiam a respeito das competências das disciplinas que tratam da construção, bem como das formas “corretas” de construir, que, por fim, deram origem a uma reapropriação do termo da tectônica. Este debate é aqui tratado como o “debate alemão”, dada sua origem nos círculos acadêmicos de Berlim, ainda que o país não fosse, na época, um estado nacional unificado.

2.3 O DEBATE ALEMÃO NO SÉCULO XVIII

Na segunda metade do século XVIII, imperava um descompasso entre teoria e prática arquitetônica. Como já apontado neste trabalho, o ofício da arquitetura era fundamentado nas tradições clássicas, mas, os avanços técnicos na área da engenharia, a partir da popularização do aço e do vidro – ausentes nas formas

clássicas, motivaram novas demandas sociais, e, conseqüentemente, uma nova interpretação da construção (BERGDOLL, 2000). Na Alemanha, o surgimento das novas universidades criava o ambiente propício para o desenvolvimento de novas teorias. Nesse contexto, um debate intelectual a respeito dos diversos ofícios da arte e da ciência, entre as décadas de 1830 e 1860, resultou na primeira reapropriação do conceito helênico da “tectônica” (CANTALICE, 2015).

O “debate alemão” tomou seu delineamento inicial a partir do clássico “Reflexões sobre a imitação das obras gregas na pintura e na escultura” (1755), de Johann Joachim Winckelmann. Propunha a obra um ideal de beleza para as artes, incluindo a arquitetura (uma vez que se trata da arte de construir), inspirado nas artes gregas, apontando que sua replicação perfeita deveria fazer parte de um modelo político nacional, caminhando para a reforma protestante (BERGDOLL, 2000). Este trabalho teve repercussão em toda a Europa e os ideais de Winckelmann influenciaram pensadores de todas as gerações na Alemanha. Produziu um efeito que, posteriormente, em 1935, Eliza Butler se referiria como a “tirania da Grécia sobre a Alemanha” (CANTALICE, 2015).

Um debate mais específico em torno da tectônica inicia, propriamente, após a publicação de “Em qual estilo devemos construir?” (1828), de Heinrich Hübsch (1795-1863). Nessa obra, seu autor questionava a adoção da arquitetura clássica como forma dominante da era contemporânea, introduzindo a noção dos “estilos” ao debate (CANTALICE, 2015). O argumento central de Hübsch é que as construções não deveriam ser regradas a partir de conteúdos estéticos ou éticos pré-estabelecidos. Deveriam ser, segunda sua obra, resposta do desenvolvimento técnico e científico frente às condições sociais em cada época, aos materiais disponíveis e ao clima – interpretando o “estilo” como uma resposta ao ambiente.

Para Hübsch, o conceito de “beleza” da arquitetura grega, tão debatida naquele período, estava relacionado ao desenvolvimento social e técnico da sociedade grega, em detrimento do puro formalismo, sendo equivocada a imitação de suas formas, já ultrapassadas diante das novas técnicas e demandas sociais (CANTALICE, 2015). Assim, argumentou a favor de uma “arquitetura verdadeira”, pertinente às tecnologias e demandas sociais de seu período, conceito ao qual cunhou como “tecnoestática” e

pelo qual procurava aceitar novas tecnologias e as entender como parte das necessidades de seu tempo (CANTALICE, 2015).

Karl Friedrich Schinkel (1781-1841), tido como o grande arquiteto alemão do século XIX, inspirado na ideia de Hübsch, defendeu a dissociação entre arte e construção para o entendimento da Arquitetura. Advogou a favor do emprego de estilos decorativos como uma forma de linguagem acessória capaz de explicar as tecnologias estruturais empregadas nas edificações (SCHINKEL, 1879). A partir da sua concepção de uma “arquitetura histórica”, idealizou e desenvolveu uma maneira própria para expressar a arquitetura nacional prussiana, que buscou conciliar os avanços técnicos da época com a tradição arquitetônica alemã, valendo-se dos artifícios compositivos da Arquitetura Clássica, entretanto substituindo as formas empregadas por formas equivalentes da construção vernacular nacional (CANTALICE, 2015).

Em 1830, Karl Otfried Müller (1794-1840) publica o livro “Compêndio de arqueologia da arte”, em que emprega, pela primeira vez, o termo “tectônica” em uma perspectiva reformada. O livro, em forma de manual, é dividido em duas partes. A primeira, retrata uma visão histórica das inovações das artes e da arquitetura grega, representadas nas diferentes ordens da cultura helênica – dórica, jônica e coríntia, relacionando sua concepção à diversidade de técnicas e locais de origem. Na segunda parte, trata, especificamente, da tectônica, apresentando-a como a “arte da construção”. Considera-a em um senso geral, que não englobava apenas construções, mas também vasos, mobiliários e utensílios de madeira em geral, desde que, em sua confecção, houvesse correspondência entre a arte e a técnica (CANTALICE, 2015). Para figurar como tectônica, a produção de um artefato qualquer deveria conter três critérios: utilização de materiais fornecidos pela natureza, carregar as impressões resultantes do manejo das mãos humanas e ter uma finalidade específica para reger o motivo e o tipo da construção.

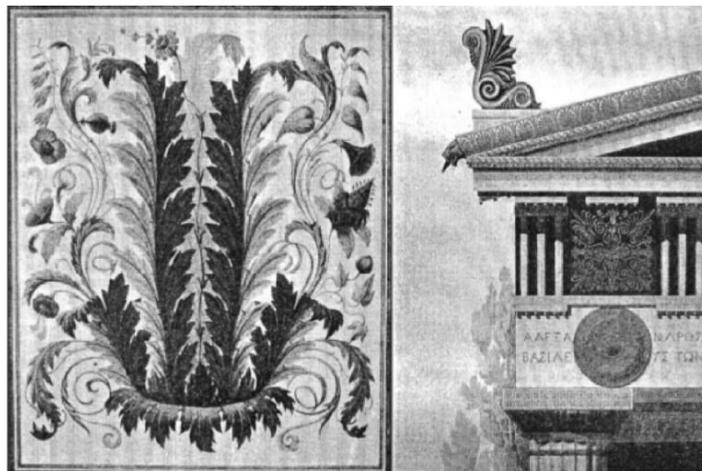
Karl Bötticher (1806-1889), arqueólogo especializado em teoria da arquitetura, publicou, em 1844, o livro “A tectônica os helênicos²” (1844), em que investigou os processos que guiam a prática arquitetônica dos gregos antigos. Na sua publicação,

² Obra sem tradução para o português (tradução nossa).

argumentou que os gregos antigos teriam criado e aperfeiçoado um sistema projetual para formar edificações, ao qual referiu-se como “tectônica”. A partir desta sistematização projetual, seria possível garantir uma harmonia entre os preceitos estruturais e simbólicos da edificação, de forma que cada detalhe construtivo fosse concebido preservando tanto a coerência com a “essência” dos materiais empregados, quanto os “princípios históricos fundamentais”, respeitando o caráter histórico e cultural da construção (GUTSCHOW, 2000).

Para defender suas ideias, propôs a tectônica como estudo integrado da estrutura, função e simbolismo, ou seja, uma expressão artística cultural, representados através da ornamentação. Justificava sua proposta pelo fato de que os mesmos, na Arquitetura Clássica grega, eram constantemente adaptados em resposta às mudanças técnicas e dos locais de produção (figura 2). Logo, é possível dizer que a tectônica, para Bötticher, era compreendida como uma atividade de formação das edificações remontando sua harmonia com a cultura humana, em uma perspectiva historicista mediante a “ornamentação artística”, resultando na expressão de um “senso de pertencimento” da edificação proveniente da relação dialética entre suas dimensões ontológicas e representativas (SCHWARZER, 1993).

Figura 2 – Estudo de Bötticher a respeito dos ornamentos dóricos



(fonte: DE MATTIA, 2012)

Apesar da aparente simplicidade, a proposta para a tectônica de Bötticher representou uma quebra de paradigma na sua época, pois, permitia a produção de uma arquitetura sujeita à interpretação de um “gênio criativo” e, não mais, nas soluções finitas de tratados construtivos ou réplicas das regras compositivas clássicas (SCHWARZER,

1993). É preciso ressaltar que a relação entre tecnologia e arquitetura gregas, na concepção de Bötticher, não tinha a finalidade de justificar o uso das tecnologias de construção dos gregos antigos, mas sim de compreender a dialética entre tecnologia, materiais e cultura na Arquitetura Clássica. A sua intenção foi, portanto, de conformar uma tectônica mutável, capaz de “evoluir”, conformando novos arranjos técnicos e linguagens estéticas baseados, como afirmava, na expressão das “forças cósmicas e simbólicas” atuantes nas edificações (SCHWARZER, 1993).

As ideias de Bötticher pretendiam endereçar novas soluções para as necessidades do período histórico em que vivia, ressonando as ideias da tectônica histórica de Schinkel. Em seu entendimento, tanto os gregos antigos quanto os góticos já haviam esgotado o potencial da utilização da pedra na construção. Desta forma, considerava que o desenvolvimento, no século XIX, requeria a introdução do aço como inovação material na construção, argumentando a favor de suas qualidades tectônicas (GUTSCHOW, 2000). Portanto, elaborou seu conceito de tectônica de uma forma capaz de abarcar a utilização do aço como símbolo da expressão do seu tempo, propondo a separação estética da tectônica em sua forma artística (“*Kunstform*”), relativa à expressão simbólica, e sua forma operativa (“*Werkform*”), relativa às técnicas e tecnologias empregadas nos componentes estruturais.

Esta solução teve a intenção de tornar palpável e aplicável, na prática, o conceito de tectônica, em um processo criativo a conciliar as necessidades mecânicas, materiais e técnicas com as necessidades simbólicas. Desta forma, influenciou a Europa central, ao longo do início do século XX, considerando sua familiaridade tanto com os ideais estéticos do iluminismo quanto do contrailuminismo, servindo de “caminho do meio” para uma disputa entre “arte” e “função” (SCHWARZER, 1993). Schwarzer (1993) salienta que os trabalhos de Bötticher viriam a influenciar, ainda, os demais teóricos da tectônica desse período, como Gottfried Semper, na elaboração de seus próprios conceitos.

Gottfried Semper (1803-1879), arquiteto e professor de Arquitetura, especializou-se no debate da estética. Em seus trabalhos iniciais, Semper interpretou a tectônica na sua forma clássica, referindo-se apenas às construções leves, feitas em madeira. Entretanto, em momento de maior maturidade teórica, especialmente após o contato com as obras do conterrâneo Bötticher (SCHWARZER, 1993), passou a referir-se à

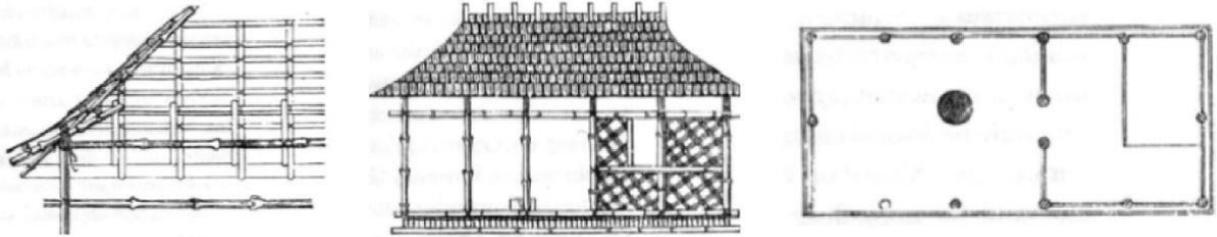
tectônica como a expressão cultural, alcançada através da relação entre as técnicas do artesanato e o uso dos materiais naturais, configurando uma “arte cósmica da fabricação” (AMARAL, 2009; CANTALICE, 2015).

Em suas obras teóricas, Semper pretendia formular uma teoria geral da arquitetura. Baseava-se em preceitos antropológicos que permitissem sua compreensão a partir do processo de assentamento das sociedades primitivas, associando à necessidade por abrigos, com o desenvolvimento paralelo das artesanias, como a tecelagem e a alvenaria (SCHWARZER, 1993). Logo, apontava que, através do estudo da relação entre os materiais disponíveis em uma região, as técnicas construtivas e artesanais desenvolvidas e as características socioculturais da comunidade, seria possível conformar uma teoria da arquitetura mais objetiva, capaz de explicar desde sua forma mais simples – o “abrigo” – até a mais desenvolvida – a “arquitetura” (MADEIRA, 2015).

Desta maneira, reconhecia que as construções se dão de maneiras diferentes em sociedades distintas. Assim, desconsidera uma teoria fechada e imutável e dá espaço para uma interpretação flexível, associada às necessidades, condições e recursos locais. Portanto, defendeu a existência de processos de adaptação das edificações a partir destas especificidades locais, influenciando diferentes arranjos construtivos (SEMPER, 1989 [1851]). Logo, diferente de Bötticher, que entendia a relação harmônica entre as partes das edificações como origem de sua beleza, para Semper, esta estava associada a aplicação coerente dos materiais em relação ao seu contexto.

Para tornar prática suas ideias morais a respeito do construir, em 1851, Semper publicou o livro “Os quatro elementos da Arquitetura”. Baseando-se na tipologia das cabanas caraíbas (figura 3), influenciado pelas ideias de Laugier, explica os princípios formativos presentes na construção de abrigos primitivos. Desta forma, aponta quatro elementos que estabelecem uma lógica compositiva destas, simbolizando a “essência” da arquitetura, como representação dos seus “princípios primordiais”, aos quais originam, através de gestos histórico-culturais, sua expressão e arranjo estrutural (SCHWARZER, 1993).

Figura 3 – Representação da cabana primitiva caraíba



(fonte: HVATTUM, 2004)

Os quatro elementos não possuem uma tradução literal para o português, de forma que, ao fazê-lo, perde-se parte do sentido conferido pelo autor. Entretanto, em um senso aproximado, são eles o “piso”, referente ao ato de apropriar-se do espaço com segurança, moldando e elevando o terreno; a “cobertura”, relativa à vedação horizontal do abrigo e elemento mais importante na conformação do aspecto do abrigo, pois afeta a condição dos demais pela sua necessidade de sustentação; o “fechamento”, que diz respeito aos elementos verticais que “revestem” o abrigo e delimitam seus espaços e limites; e, por fim, o “coração”, representando o núcleo social da edificação, usualmente associado ao local destinado à lareira, que reúne seus habitantes em torno do fogo (AMARAL, 2009; CANTALICE, 2015).

Para Semper, esses elementos eram construídos a partir de dois partidos arquitetônicos possíveis, associados à sua técnica de produção: a “tectônica” e a “estereotomia”. A tectônica se referia a lógica construtiva e estrutural a partir do emprego da madeira, caracterizada como a elaboração de “frames” com elementos leves e descontínuos de origem vegetal, articulados a partir de “nós” ou “juntas”, que seriam produzidas a partir das técnicas de trançados da tecelagem. A estereotomia, por outro lado, se referia a produção a partir de materiais homogêneos e pesados, como a terra e a pedra, caracterizados por volumes contínuos que servem de estrutura e vedação (FRAMPTON, 1995).

Mais tarde, Semper revisou os quatro elementos, garantindo a cada um deles propriedades “tectônicas”. Refere-se, neste momento, a cada um deles como tendo a capacidade de fornecer uma “expressão cultural” que emergia da associação entre os materiais e as técnicas artesanais empregadas em sua produção (MADEIRA, 2015). Logo, o piso passa a estar relacionado aos ofícios da cerâmica e das artes que lidam com a modelagem a partir da terra; a cobertura, ao ofício da carpintaria na construção

de suas estruturas; o fechamento, aos ofícios ligados à confecção e ao trabalho com tecidos, como a tapeçaria; e, por fim, o coração, aos ofícios da alvenaria no manejo do local destinado ao fogo (CANTALICE, 2015).

Esta lógica de interação entre o trabalho artesanal e os materiais locais na construção, para Semper, estava associada à origem dos primeiros artefatos produzidos pela humanidade (figura 4). Para o autor, o desdobramento dessa lógica, em diferentes escalas, dos produtos aos sistemas construtivos e edificações, daria origem ao que descreveu como “estilo”. Assim, este era um produto dos fatores culturalmente herdados, em constante modificação, em relação as suas condições contextuais (HVATTUM, 2004). Esta noção de “estilo”, idealizada por Semper, foi aplicada como ferramenta para o estudo de artefatos e construções, a partir do qual seria possível distinguir e determinar sua procedência cultural. Ou seja, a partir da análise da associação entre as técnicas artesanais e recursos locais empregados, seria possível determinar ou examinar uma expressão cultural (figura 5) (FRAMPTON, 1995).

Figura 4 – Ilustração de artefatos produzidos por diversas culturas a partir de técnicas da tecelagem



(fonte: SEMPER (1878 *apud* HVATTUM, 2004)

Figura 5 – Ilustração de jarras antigas produzidas por egípcios (à esquerda) e gregos (à direita): sua forma e adornos variam de acordo com condições ambientais e sociais



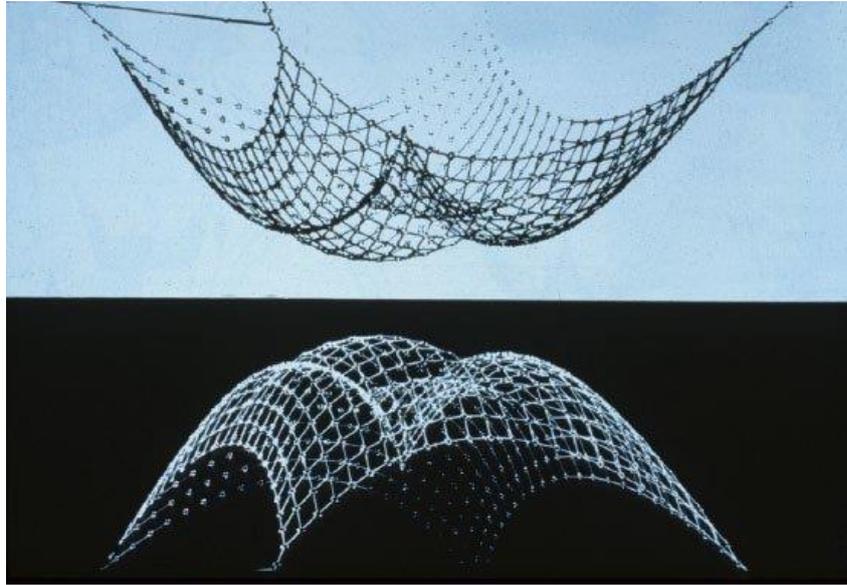
(fonte: SEMPER (1878 apud HVATTUM, 2004)

2.4 A RETOMADA DA TECTÔNICA NO SÉCULO XX

A partir do século XX, por influência das incursões das vanguardas na constituição de uma linguagem universal para a industrialização, os temas referentes à materialidade e à construção, como a tectônica, foram relegados a um segundo plano. Alguns estudos em universidades alemãs, na década de 1930, ainda trataram do assunto da tectônica com a intenção de resgatar e perpetuar as obras de Semper. Não obtiveram repercussão na crítica e teoria dominante, anglo-saxã, muito por conta do idioma de publicação – o alemão (CANTALICE, 2015).

Enquanto o termo era relegado ao ostracismo, no meio acadêmico, na prática a ideia da concepção arquitetônica baseada na integração entre os aspectos construtivos, estruturais e materiais foi experimentada. No início do século XX, trabalhos de arquitetos como Antoni Gaudí, Heinz Isler, Félix Candela, Frei Otto e Sérgio Musmeci, que foram pioneiros na busca por uma arquitetura não-tipológica, investigaram métodos para a produção de edificações a partir da simulação das forças atuantes sobre elas. Para tal, passaram a estudar a aplicação de processos de formação da natureza (morfogênese natural) na geração de estruturas otimizadas através de aparatos analógicos (figura 6) que permitiam a exploração da forma, processo identificado como “*form-finding*” (TEDESCHI, 2014).

Figura 6 – Malha suspensa e fotografia invertida de modelo da estrutura de uma membrana, SEIBU-Team 1973 IL-Archive 2.37.60



(fonte: GASS, 2016)

A retomada do debate a respeito da tectônica aconteceu, propriamente, apenas na década de 1960, com a crise do movimento moderno (1929-1970). Ressurge, naquele momento, interesse teórico nos aspectos simbólicos da Arquitetura associados aos aspectos “construir”, a partir dos trabalhos de Collins (1960) e Sekler (1965) (AMARAL, 2009). Peter Collins (1920-81) foi um arquiteto e premiado historiador de Arquitetura que lançou uma série de artigos, entre as décadas de 1950 e 1960, e, posteriormente, foram reunidos e transformados no livro “*Concrete: the Vision of a New Architecture*³ (1959)”. Nesta publicação, explorou a história do concreto armado desde o início de seu emprego no século XIX, sem fazer qualquer referência direta à tectônica. Entretanto, a maneira como destaca a relação entre domínio técnico e criativo como elemento chave para o a expressão do concreto, trouxeram à tona questões relativas à “tectonicidade” da obra arquitetônica, valorizando a materialidade e o saber-fazer (CANTALICE, 2015).

Eduard Sekler (1920-2017), por outro lado, foi um historiador e professor emérito de Arquitetura e Artes Visuais de Harvard, que publicou o artigo intitulado “*Structure, Construction, Tectonics*⁴” (1959), em que aborda diretamente a tectônica, com a pretensão de reintroduzir seu debate. Nesta publicação, assume a posição de que, a

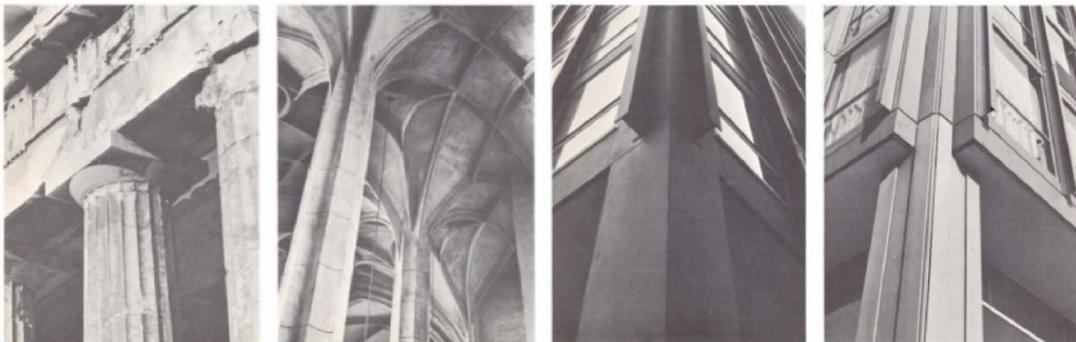
³ “Concreto: A visão de uma nova arquitetura” (tradução nossa).

⁴ “Estrutura, construção, tectônica” (tradução nossa).

expressão tectônica, deve corresponder ao desenvolvimento tecnológico contemporâneo. Esta interpretação se contrapõe as vertentes cenográficas de concepção arquitetônica, pois busca valorizar aspectos representacionais relativos à construção e aos materiais (CANTALICE, 2015).

De acordo a posição assumida, Sekler define a tectônica como a qualidade de um fenômeno estético que emerge dos sistemas construtivos e a equipara à “empatia” (SEKLER, 1964), conceito originado na Filosofia e Psicologia. Para o autor, esta expressão surgiria, exclusivamente, a partir da interação entre a estrutura e a construção, não sendo perceptível a partir de qualquer uma dessas isoladamente. Em sua obra, a “estrutura” é compreendida como um conceito abstrato, não pertencendo a qualquer material em particular, mas tratando-se apenas dos princípios e regras funcionais da construção. A “construção”, por outro lado, representa a lógica que guia o processo de incorporação da materialidade ao sistema estrutural (SEKLER, 1965; SCHWARTZ, 2017). Logo, pode-se dizer que, para Sekler, a tectônica é o fenômeno que emerge da integração da lógica estrutural com a construtiva na elaboração criativa e intencional do sistema construtivo de uma edificação garantindo seu “caráter” ou “personalidade” (figura 7).

Figura 7 – Imagens ilustrativas do fenômeno estético da “empatia” em diferentes sistemas construtivos



(fonte: SEKLER, 1965)

As obras de Collins e de Sekler reforçaram, ainda mais, o interesse pelo resgate das obras de Semper e do debate da tectônica no cenário crítico anglo-saxônico. Em função disto, em 1976, foi organizada uma conferência internacional para marcar o centenário de sua obra, culminando em traduções de alguns de seus escritos para a língua inglesa, a partir do final da década de 1980 (CANTALICE, 2015). Neste período,

outro conceito próximo da tectônica, os “detalhes construtivos”, foram amplamente explorados em termos de seu papel e potencial de articulação na concepção arquitetônica, afetando a expressão geral das edificações, de forma semelhante às “juntas” nas obras de Semper. Assim, teóricos como Vittorio Gregotti, Marco Frascari e Edward Ford se debruçaram nestas questões, explorando as dimensões estéticas e simbólicas dos “detalhes”, reforçando um movimento de reação à lógica da “visualidade” na arquitetura, abrindo o caminho para a emergência de um novo debate tectônico, agora em âmbito internacional (CANTALICE, 2015).

O conceito de tectônica foi enfim retomado e aprofundado na década de 1990 por Kenneth Frampton, importante teórico, historiador e professor de Arquitetura. É considerado o responsável pela popularização do termo “tectônica”, no ambiente da teoria e da crítica arquitetônica, a partir de suas publicações “*Towards a critical regionalism: Six points for an architecture of resistance*”⁵, em 1983, “*Rappel à l’ordre: The case for the tectonic*”⁶, em 1990, e, em 1995, “*Studies in tectonic culture*”⁷. A

As ideias de Frampton têm como inspiração, dentre outras, a obra de Heidegger “Da origem da obra de arte”, de 1950, em que o autor discorre sobre a etimologia da “técnica” e suas implicações filosóficas. A origem do termo seria o grego antigo “*tikto*”, cujo significado é “produzir”, sugerindo a inexistência de uma distinção, para os gregos antigos, entre os conceitos de “arte” e de “artesanato” (na obra original “*craft*”, que pode ser traduzida também como “artesanaria” ou “artifício”). Desta forma, isto implicaria num estado no qual o “conhecer” e o “fazer” são integrados, e, a dimensão de um é revelado pelo desenvolvimento do outro (FRAMPTON, 1995). Em outras palavras, a condição da existência de um objeto produzido corresponde ao conhecimento e às condições disponíveis no meio para a sua produção. No caso da tectônica, as edificações. A própria forma de Frampton referir-se ao termo “poética”, em detrimento de “poesia”, sugere a referência ao termo “*poietike*”, cujo significado se aproxima de “ciência da produção”. Essa definição implica, também, que o contexto é parte intrínseca ao objeto em seu processo de produção, conformando sua dimensão cultural.

⁵ “Em direção ao regionalismo crítico: seis pontos para uma arquitetura da resistência” (tradução nossa).

⁶ “Resgate do que se perdeu: o caso da tectônica” (tradução nossa).

⁷ “Estudos sobre cultura tectônica” (tradução nossa).

O interesse no assunto da tectônica, por parte de Frampton, está intimamente relacionado à sua crítica a respeito das correntes teóricas do Modernismo e do Pós-Modernismo, expressas em seu manifesto *“Towards a critical regionalism: six points for a architecture of resistance”* de 1983. Neste, buscou, através da formulação do “regionalismo crítico”, uma reconciliação das edificações com os aspectos locais e artesanais de produção, baseando-se no contexto no qual se inserem (FRAMPTON, 1983). Para tal, propõe uma abordagem “tátil”, em detrimento do emprego de artifícios visuais e recursos cenográficos nas edificações, de forma que a tectônica reflita a manifestação cultural de um determinado local ou região, contrapondo a uma pura mercantilização da Arquitetura (figura 8) (FRAMPTON, 1983; 1995).

Figura 8 – Interior da câmara do conselho da Prefeitura Municipal de Säynätsalo



(fonte: FRAMPTON, 1995)

A abordagem tátil, referida por Frampton está de acordo com a crítica de teóricos, como Pallasmaa, que em sua obra *“Os olhos da pele: Arquitetura e os sentidos”*, de (1996), destaca a “opressão” da visão sobre os demais sentidos na sociedade, tanto na esfera do trabalho criativo como da própria produção científica, resultando na perda

de uma “sabedoria” associada ao corpo humano, que exprime desconexão com a materialidade e a temporalidade (PALLASMAA, 2014 [1996]). Assim, a importância dos demais sentidos deveriam ser resgatada e a hierarquia entre eles repensada. Isto exprimiria a associação entre a produção arquitetônica e a experiência humana – material e temporal. Frampton ainda considerava o “lugar” como ente pertencente a essa abordagem tátil, de maneira que suas qualidades, como topografia e paisagem, constituíssem uma extensão do corpo. Assim, a mediação entre edificação e o lugar, presentes muitas vezes em técnicas locais, é que deveria conduzir às soluções de design e não técnicas “universalizantes”, ou seja, aquelas com potencial de serem replicadas da mesma maneira em qualquer local do mundo (FRAMPTON, 1983; 1995).

Por fim, após o extenso trabalho de Frampton em relação a tectônica, não houve grandes alterações na sua interpretação, que se diferencia daquelas já apontadas por Sekler, Gregotti, Frascari ou Ford. Desta forma, o debate teórico em relação à tectônica toma um novo fôlego na transição do século XX para o XXI, a partir do estudo do impacto das ferramentas digitais na produção do ambiente construído, trabalhando, paradoxalmente, o caráter materialista da tectônica a partir do caráter “virtual” associado ao digital, a ser retratado na próxima sessão.

2.5 A “TECTÔNICA DIGITAL” NO SÉCULO XXI

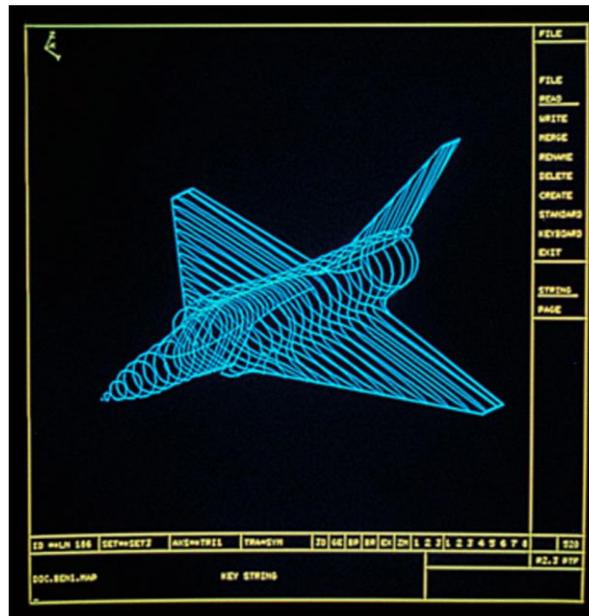
O século XXI inicia marcado pela “Era Digital”, ou “Era da Informação”⁸, caracterizada pelas transformações provocadas pelas invenções, do circuito digital, do transistor e do computador, e pelas novas ideias apresentadas pelas teorias da informação, da complexidade, da cibernética e da teoria geral dos sistemas (LENZ; CELANI, 2015). Nesse contexto, a representação, o design e a produção do ambiente construído tornam-se digitalizados e passam dos meios analógicos, baseados no desenho e no papel, para os meios digitais, baseados na informação e no ambiente digital, dando origem ao design e à fabricação digitais (MITCHELL, 2005).

Segundo Kolarevic (2003a), o design digital tem origem nas indústrias aeronáutica e naval (figura 9), entretanto sua aplicação na Arquitetura abriu novos territórios para a exploração conceitual, formal e tectônica com a configuração de morfologias com foco

⁸ Segundo James W. Marcum (2006), a “era da informação” é uma definição criada por Daniel Bell e apresentada na sua publicação “*The coming of Post-Industrial Society*”, 1973.

nas propriedades emergentes e adaptativas da forma (KOLAREVIC, 2003b). Essas propriedades resultaram em uma mudança radical na lógica de design. Transmutou a “descrição” da forma das edificações, mediada por normas técnicas ou tradições construtivas, para a sua “prescrição” através de processos formativos, em que as formas são geradas em ambiente virtual, com a utilização de ferramentas digitais, empregadas de acordo com um método generativo computacional (OXMAN, 2006).

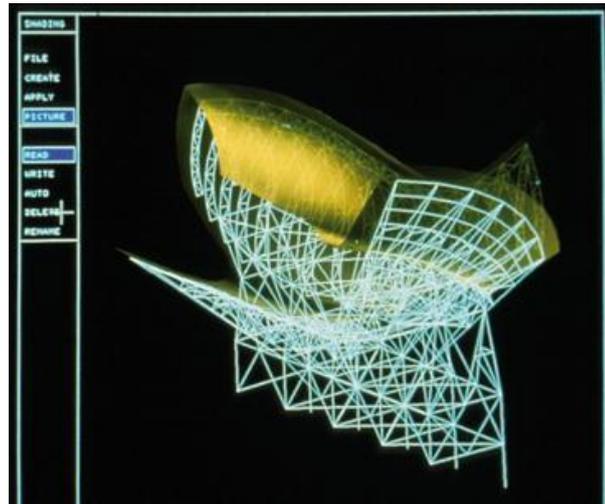
Figura 9 – Modelo 3D do caça francês “Mirage”, produzido pelo software “CATIA”



(fonte: SHAKED, 2016)

Tão importantes quanto as novas capacidades de representação do design digital, foram as inovações resultantes da integração das tecnologias digitais à manufatura – a chamada fabricação digital. A partir do seu advento, caracterizado pelo emprego de máquinas com controle numérico computadorizado (CNC) associadas à softwares de manufatura auxiliada por computador (CAM), passou a ser possível produzir, de maneira rápida e flexível, maquetes, protótipos, componentes, e, até mesmo, edificações de alta complexidade formal a partir de técnicas de prototipagem rápida (figura 10) (KOLAREVIC, 2003a).

Figura 10 – Modelo 3D, produzido pelo software “CATIA”, da instalação artística “Barcelona Fish”, de Frank Gehry (1992)



(fonte: CANEPARO *et al.*, 2014)

A capacidade de conceber e produzir em larga escala componentes complexos e diversificados inaugurou o discurso de “customização em massa”, característico da capacidade produtiva da era digital, propagando uma nova lógica de design baseada na produção serial associada tanto à variação quanto à diferenciação (MITCHELL, 1999). Assim, pode-se dizer que a customização em massa configurou uma quebra do paradigma produtivo da Era Industrial – da padronização, repetição e normatização, marcando a sua transição para um paradigma produtivo da Era Digital – da customização e diferenciação (OXMAN, 2006). Por fim, pode-se dizer que a produção de “elementos não-padronizados” passou a figurar no foco de teóricos em geral, a partir da “exibição de arquiteturas não-padronizadas”, ocorrida em Paris, no ano de 2003, sob o pretexto de explorar as mudanças sociais, políticas e econômicas introduzidas pela implementação generalizada deste tipo de produção na arquitetura, design e políticas territoriais e urbanas (OXMAN, 2006).

A inauguração do Museu Guggenheim de Bilbao (figura 11), no final do século XX, projetado pelo arquiteto Frank Gehry, é considerado um ponto de inflexão para a teoria e produção arquitetônica, pois tornou-se um símbolo do potencial das capacidades produtivas proporcionadas pelas tecnologias digitais na Arquitetura e Construção (KOLAREVIC, 2005). A utilização inédita de técnicas que integram, na construção de uma edificação, o projeto auxiliado por computador (CAD) à manufatura auxiliada por computador (CAM), como o design digital e a fabricação digital, abriu portas para uma

nova era de formas livres e não-euclidianas que popularizaram a produção digital de edificações (MITCHELL, 2005).

Figura 101 – Museu Guggenheim de Bilbao, projeto do arquiteto Frank Gehry



(fonte: MITCHELL, 2005)

A partir deste novo paradigma, teóricos, como Philip Beesley (2000), Neil Leach (2004), Rivka Oxman (2009) e Patrik Schumacher (2012), destacaram o fato da tectônica, na sua interpretação tradicional, não ser capaz de explicar o estado dinâmico da produção digital. As afirmações destes teóricos sugerem uma necessidade de introdução de novas variáveis teóricas na definição tectônica, a fim de comportar as capacidades produtivas dos processos de design e fabricação digitais. Seria possível, com isso, integrar uma dimensão digital à tectônica tradicional, dando origem a uma tectônica digital (BEESLEY; SEEBOHM, 2000; LEACH, 2004; OXMAN, 2009; SCHUMACHER, 2012). O principal desafio para tal, entretanto, é conciliar o caráter contraditório entre os termos “tectônica” e “digital”. A tectônica expressa uma relação direta com o mundo físico e concreto, a partir de sua abordagem tátil e histórica, enquanto, o digital, está relacionado ao mundo virtual,

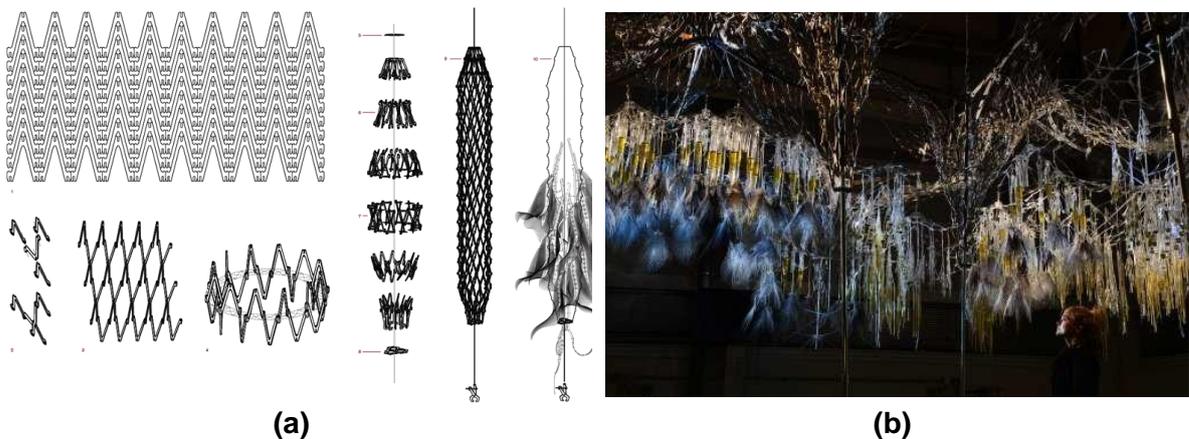
A primeira tentativa de conceber uma abordagem “tectônica digital” partiu de Philip Beesley, arquiteto e escultor, em conjunto com o filósofo Thomas Seebohm (1934-2014), na publicação do artigo “*Digital Tectonic Design*”⁹, no ano 2000. Neste, os autores apresentam a tectônica digital como um método, proporcionado por uma abordagem de design digital, chamada de “projeto tectônico digital”. Logo, resultou em

⁹ “Design tectônico digital” (tradução nossa).

um método específico que integrava o design auxiliado por computador (CAD) com métodos construtivos tradicionais (BEESLEY; SEEBOHM, 2000).

O método proposto pelos autores baseia-se na exploração criativa das relações geométricas e espaciais de um objeto a partir de seus encaixes (articulações). Vale-se de um processo generativo computadorizado de design, na produção de um sistema de formas (padrões) com o uso de algoritmos, que permitem a replicação destas em diferentes escalas, conformando o seu “caráter”, enquanto dimensão expressiva digital (figura 12). Entretanto, a abordagem do “design tectônico digital” foi criticada por outros teóricos da tectônica digital por não utilizar, propriamente, do potencial computacional para gerar soluções de design (OXMAN, 2010). Estes consideraram se tratar de uma reprodução da lógica da elaboração da forma (conhecida por “*form-making*”) em meio digital (KOTNIK, 2010; WOODBURY, 2010).

Figura 112 – a) Processo criativo da instalação artística no pavilhão do Canadá, para a Bienal de Veneza, em 2010 (à esquerda); b) Protótipo finalizado (à direita)



(fonte: BEESLEY, 2012)

Em 2004, a partir do livro “*Digital Tectonics*¹⁰”, Neil Leach, professor de Arquitetura e colaborador de programas da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) para uma possível colonização da Lua e de Marte, propõe uma primeira abordagem para a tectônica digital que se utiliza das plenas potencialidades computacionais. Baseia sua publicação na ideia de uma quebra de paradigmas no “*design thinking*”, proporcionada pelo uso das ferramentas digitais, permitindo que o designer trabalhe sua sensibilidade tectônica com o auxílio de processos computacionais de análise,

¹⁰ “Tectônica digital” (tradução nossa).

geração e otimização da forma. Através destes, seria possível aferir e gerar diversas soluções de design de maior eficiência estrutural, acústica, ambiental, construtiva e/ou programática. Desta forma, o papel do designer passaria a ser o de garantir as melhores condições para o sistema computacional formular uma melhor configuração para o projeto, com a menor interferência possível (LEACH *et al.*, 2004).

As ideias de Leach estão associadas ao conceito emergente da morfogênese. O termo é utilizado, originalmente, nas Ciências Biológicas, referindo-se à geração da forma e criação de padrões em organismos vivos, através de processos de crescimento e de diferenciação. Este conceito foi adaptado para se referir a uma abordagem computacional de design orientada pela performance do material, com foco no processo projetual em detrimento da representação (LEACH, 2009). Na morfogênese digital, a construção da forma, ou “*form-making*”, é substituída por processos formativos, chamados de “*form-finding*” (HENSEL *et al.*, 2004). Logo, a forma passa a ser relegada a uma posição secundária da “*formação*”, visto que a “*informação*” altera a forma baseada em seus critérios de “*performance*”. Desta maneira, a arquitetura passa a ser conformada em função de parâmetros de *performance* associados aos materiais (LEACH, 2009).

Logo, a tectônica digital, para este autor, diz respeito à expressão da tectônica, a partir de técnicas computacionais, no sentido de integração e complementação, em que o projetista alcança uma compreensão maior do comportamento dos materiais através da capacidade dos softwares em realizar análises de desempenho e gerar soluções, enquanto “ferramentas tectônica digitais” (figura 13) (LEACH *et al.*, 2004). Essas ferramentas, por fim, resultam de uma associação das dimensões ontológicas e representacionais da arquitetura, pois garantem que, qualquer mudança em uma dessas dimensões, resulte em manifestações na outra. Na prática, possibilita que as demandas possam influenciar diretamente a formação da edificação a partir do diálogo contínuo entre essas dimensões (LEACH *et al.*, 2004). Vale ressaltar, entretanto, que a dimensão “representacional”, referida pelo autor, diz respeito apenas a questões programáticas, associadas ao projeto arquitetônico, e não como expressão simbólica associada à bagagem cultural de uma sociedade.

Figura 12 – Instalação “Swarm Tectonics”, construída a partir de “ferramentas tectônicas digitais”, em oficina ministrada por Leach em 2002



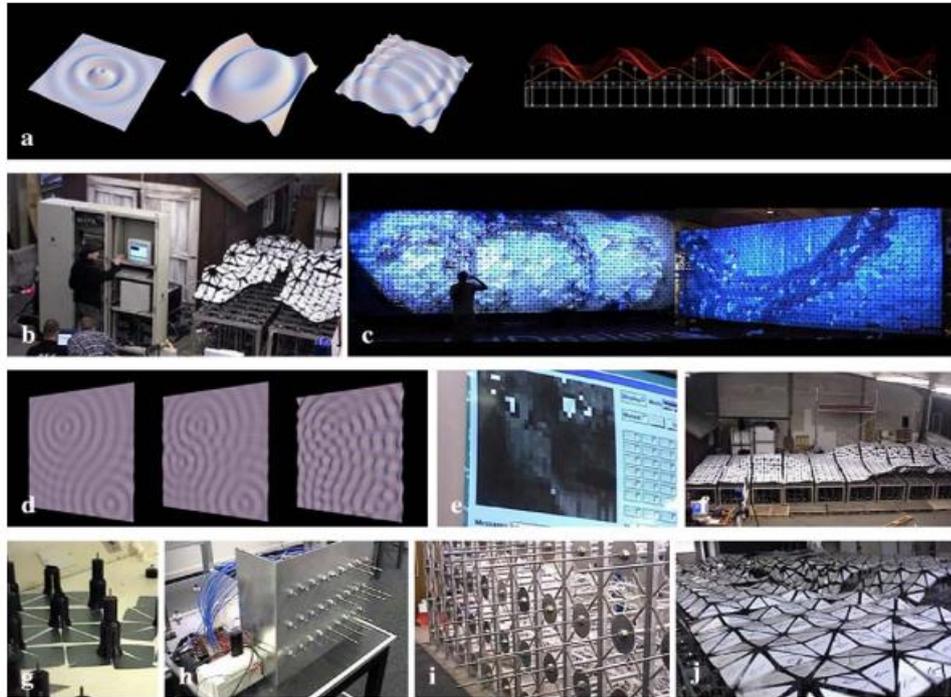
(fonte: LEACH *et al.*, 2014)

Yu-Tung Liu e Chor-Keng Lim, publicaram, em 2005, o artigo “*New tectonics: a preliminary framework involving classic and digital thinking*”¹¹, em que reconhecem as transformações na construção e na arquitetura tradicionais a partir do contato com as tecnologias digitais, fazendo-se necessária uma reformulação do conceito tradicional de tectônica. Nesse sentido, propuseram que as mesmas não deveriam ser compreendidas apenas como ferramentas de design, mas, meio para designers endereçarem soluções até então desconhecidas, através de um novo processo de “*design thinking*” (LIU; LIM, 2005).

Para tal, propuseram a formulação de um “*framework*” capaz de englobar tanto os processos de “*design thinking*”, da tectônica tradicional e, da digital, buscando uma “nova teoria da tectônica” (LIU; LIM, 2005). Para a produção do *framework*, os autores adotaram a identificação dos fatores que influenciam o “*design thinking*” da tectônica digital. Assim propuseram quatro “fatores tectônicos” provenientes essencialmente das técnicas e ferramentas digitais: o movimento, a informação, a geração e a fabricação (figura 14).

¹¹ “Novas tectônicas: um enquadramento preliminar envolvendo o pensamento clássico e digital” (tradução nossa).

Figura 13 – Composição de imagens referentes ao estudo de caso dos fatores tectônicos digitais em “Aegis Hypo-Surface” do dECOi Architects



(fonte: LIU, LIM; 2005)

O “movimento” surge a partir dos projetos digitais que utilizam processos dinâmicos em seus processo de design, como a animação e o “*morphing*”. A “informação” relaciona-se a utilização, no ambiente digital, de unidades de informação digital associadas às formas construídas e a sua função, assumindo a lógica e o papel de um novo material. A “geração”, por sua vez, da capacidade de softwares computacionais em gerarem sistemas assistivos (algoritmos) no processo de evolução da forma em estágios iniciais de design, produzindo, automaticamente, um número variado de propostas de design. Por fim, a “fabricação” refere-se a utilização de maquinário e de técnicas de fabricação digital, como a prototipagem rápida e o escaneamento 3D, na exploração de novos métodos de montagem, em todas as etapas de fabricação (LIU; LIM, 2005) .

Em 2009, Rivka Oxma, pesquisadora e professora de Arquitetura do Instituto Técnico de Haifa, publicou o artigo “*Digital Tectonics as a Morphogenetic Process*”¹². Neste trabalho afirmou que as teorias contemporâneas começavam a caminhar para uma interpretação mais complexa da tectônica que aquela proposta por Frampton,

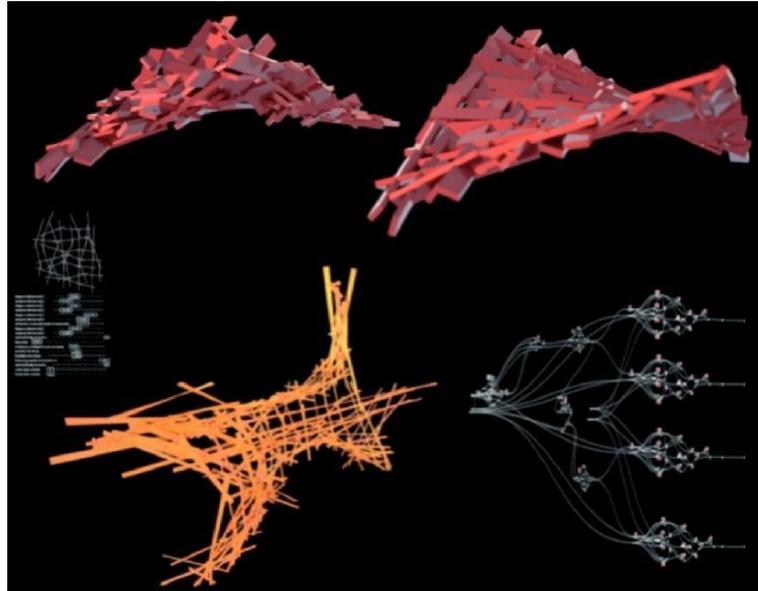
¹² “A tectônica digital enquanto um processo morfogênico” (tradução nossa).

explorando novas relações entre estrutura e materiais através de processos generativos da forma. Para autora, o conteúdo metodológico, resultante de métodos e tecnologias emergentes, originou processos digitais e potencial representacional capazes de estabelecer “novas tectônicas”. Portanto, a tectônica digital teria de ter origem em um novo conteúdo metodológico proporcionado pelas tecnologias digitais, integrando a computação a novos materiais, estruturas e construções (OXMAN, Rivka; 2009). Sendo assim, o foco da autora passou a ser o de explicar os processos formativos que originam os métodos generativos de projeto, para definir, assim, os aspectos teóricos da tectônica digital.

No ano seguinte, publicou, em conjunto com Robert Oxman, um novo artigo no qual lança as bases do que seria este conteúdo metodológico da tectônica digital, que se originaria a partir do que esses autores chamaram de um novo estruturalismo (OXMAN; OXMAN, 2010). O termo faz alusão ao processo estudado no campo da Engenharia em que se formalizam padrões estruturais, no qual os autores fazem uma revisão de seu conceito a partir de sua associação com o conteúdo teórico da morfogênese digital, como em Leach (2004). Através desta relação, buscaram explicar os princípios formativos das relações tectônicas a partir de processos de geração, simulação e otimização que permitem o estabelecimento de modelos tectônicos digitais (OXMAN; OXMAN, 2010).

Portanto, a tectônica digital, para Oxman e Oxman (2010), refere-se a um método de design, orientado por pesquisa, que explora os modelos da morfogênese digital como um meio para modular as estruturas topológicas da tectônica com auxílio de processos de *form-finding* digital. Como resultado, as topologias tornam-se parametricamente manipuláveis através do uso de programação, configurando uma espécie de “artesanato digital” (figura 15) (OXMAN, OXMAN, 2010). Este processo, segundo Rivka Oxman, diz respeito, não apenas ao emprego do design digital no processo de estruturação, mas também à fabricação digital, utilizada não somente como uma solução técnica para prototipagem do modelo, mas como lógica integrada no processo de materialização do modelo digital através de técnicas de fabricação (OXMAN, Rivka; 2017).

Figura 14 – Exploração de princípios estruturais inspirados em técnicas construtivas vernaculares para aplicação em sistemas tectônicos



(fonte: OXMAN; OXMAN, 2010)

Ainda segundo Oxman (2010), existem três abordagens diferentes de aplicar o *form-finding* para a condução desse “artesanato digital”, entendido como um “design tectônico”. A “priorização da estrutura”, no qual os princípios morfológicos de classes de estruturas são a base dos modelos; a “priorização do material”, em que o material é selecionado para que, a partir de sua análise, estabeleça os princípios estruturais; e, por fim, a “priorização da forma”, em que certos fatores geométricos da forma são pré-estabelecidos no processo de design, de maneira que os princípios estruturais e materiais devem ser adaptados a eles (OXMAN, 2010).

Apesar do interesse de Oxman na “tectônica digital” fazer parte de uma pesquisa maior, acerca da taxonomia teórica do design arquitetônico na Era Digital (OXMAN, 2006), sua contribuição para explicar, em profundidade, a tradução da relação tectônica tradicional em ambiente digital constitui talvez a mais importante contribuição em relação a esse tema.

Patrik Schumacher foi outro importante teórico a se debruçar na teoria da tectônica digital, não tanto por um debate direto em relação ao assunto, mas trazendo importantes considerações a respeito do seu papel na Era Digital. Schumacher é um dos mais renomados arquitetos da contemporaneidade, diretor do escritório de Arquitetura britânico “Zaha Hadid Architects”, e, também, autor da obra teórica “The

*Autopoiesis of Architecture*¹³, dividida em dois volumes (SCHUMACHER, 2011; 2012).

Inspirado na teoria dos sistemas sociais de Niklas Luhmann (1927-1988), Schumacher (2008) propõe a existência de um novo estilo arquitetônico em resposta à complexidade e ao dinamismo das interações sociais na Era Digital: o “Parametricismo”. Este estilo emergiria a partir da “articulação tectônica”, proporcionada pelo potencial responsivo dos modelos paramétricos frente às novas funções técnicas e sociais da sociedade digital, em uma perspectiva sistêmica e ecológica (SCHUMACHER, 2008; 2014).

A articulação tectônica, segundo Schumacher (2014), em maior profundidade, diz respeito à utilização de estratégias de diferenciação morfológica adequadas às exigências das Engenharias Estrutural e Ambiental. A tectônica, neste contexto, é compreendida como a seleção e utilização de formas e detalhes, tecnicamente engendrados em articulação com o sistema de comunicação social, em qualquer escala de artefato, proporcionando “legibilidade” e rigor técnico a partir de morfologias eficientes e articuladas com suas funções comunicativas (figura 16) (SCHUMACHER, 2014).

Figura 15 – 1) Cadeira “ACADIA 3D Printed Chair” de ZHA CODE. 2) Jaqueta produzida por Schumacher e Zivanic



Fonte: SCHUMACHER, 2017.

A dimensão “digital”, nesta perspectiva de tectônica como “articulação”, refere-se, segundo Schumacher (2017), à utilização de ferramentas generativas de design e análises computacionais capazes de otimizar parâmetros de Engenharia e de

¹³ “A autopoiese da arquitetura” (tradução nossa).

fabricação, com a finalidade de explorar a integração entre o design e a fabricação digitais (figuras 17 e 18) (SCHUMACHER, 2017). É entendimento análogo ao da proposta de Rivka Oxman, entretanto, aprofundando a dimensão e potencial ontológico e representacional da tectônica digital ao ponto de prover novas condições técnicas e representativas que caracterizam toda a sociedade sob o paradigma da produção digital. Assim, Schumacher contribui para uma perspectiva semiológica da tectônica digital, na qual todos os processos da vida social podem ser compreendidos como processos de comunicação: expressos através de simbolismos articulados “tectonicamente” em meio digital (SCHUMACHER, 2014).

Figura 16 – Instalação “Candela revisitado”, para a Bienal de 2013



(fonte: SCHUMACHER, 2017)

Figura 17 – Projeto do centro cultural Qingdao por Zaha Hadid Arquitetos



(fonte: SCHUMACHER, 2014)

Em busca de conciliar os aspectos “*hightech*” da Era Digital (computacional, global e corporativo) à sua antítese cultural (materialista, local e humanitária), Philip Yuan evocou os preceitos de Frampton, agora adaptados à ontologia digital. Assim, propôs o “Regionalismo Paramétrico” como forma de Parametricismo com parâmetros sociais. Segundo Yuan (2015), o discurso de adaptabilidade do Parametricismo pode ser a resposta às especificidades e variações regionais, expressos não apenas pelo local e clima, mas também pelos aspectos culturais inerentes das edificações, como materiais e técnicas construtivas artesanais (YUAN, 2015).

A ideia de um Regionalismo Paramétrico é influenciada pela constatação de que a operação e o progresso dos sistemas sociais sempre envolvem ricos costumes regionais e de seu patrimônio cultural e, a formação de suas convenções, está intimamente relacionada ao ambiente local e produção social. Logo, os modelos digitais deveriam incorporar a informação regional e o comportamento local em uma perspectiva mais ampla, transformando os sistemas de produção da arquitetura, a ética ecológica e o comportamento humano, levando, inevitavelmente, a inovações na morfologia arquitetônica (figura 19) (YUAN, 2015).

Figura 18 – Projeto “In Bamboo”, do escritório ARCHI-UNION, em que foi aplicada uma abordagem regionalizada de design digital.



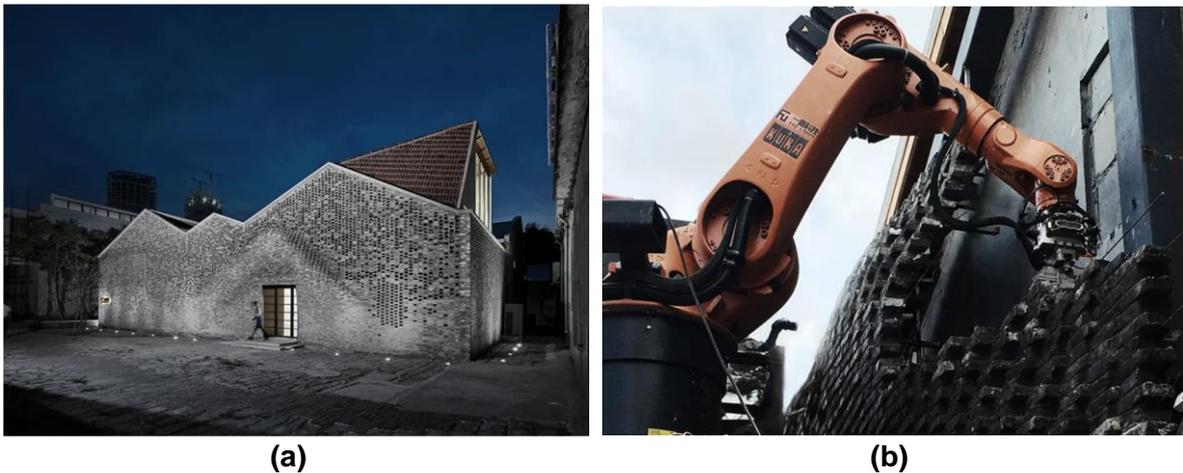
(fonte: ARCHI-UNION, online¹⁴)

Segundo Yuan (2015), a capacidade de manipular, parametricamente, modelos tectônicos rompeu completamente os limites entre o projeto e a fabricação. Permite uma metodologia integrada do ciclo de vida do projeto, desde a conceituação até a

¹⁴ Disponível em <<http://www.archi-union.com/Homes/Projectshow/index/id/57>>. Acesso em 08 de fevereiro de 2021.

operação, revisão e construção por meio da manipulação de informações geométricas. Portanto, a decisão sobre quais parâmetros geométricos são importantes na arquitetura passa a ser a chave para as abordagens de design (YUAN, 2015). Desta forma, as informações relativas ao emprego dos materiais locais na construção, bem como as regras e instruções que organizam os sistemas construtivos vernaculares, podem ser operados simultaneamente e com grande eficiência por meio do design digital (figura 20) (YUAN, 2015). Ainda segundo o autor, esta metodologia inovadora faria com que a tectônica digital auxiliasse os arquitetos a transformar a situação atual de projeto e produção arquitetônicos em “uma nova era digital” (YUAN, 2015).

Figuras 19 – “*Shi Che*”, projeto de ARCHI-UNION, no qual foi feita uma reinterpretação da arquitetura tradicional chinesa a partir da aplicação da tecnologia digital, incluindo a aplicação da robótica.



(a)

(b)

(fonte: ARCHDAILY, online¹⁵)

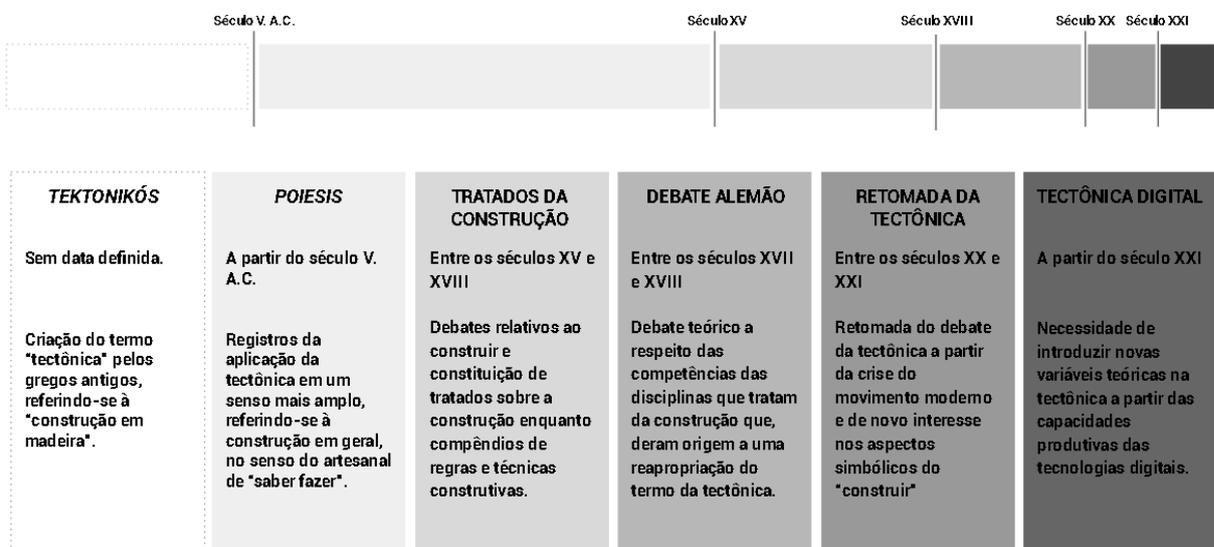
Em suas publicações, Yuan não trata especificamente do tema da tectônica digital, entretanto, suas contribuições inspiradas nas ideias de Frampton, resgatam o debate a respeito do “caráter local”, associado ao potencial representacional da tectônica em sua perspectiva digital. Mesmo que não aponte um método para tal, elucida um primeiro caminho para essa síntese, a partir da consideração de parâmetros regionais associados ao potencial de “articulação” associado ao Parametricismo.

¹⁵ Disponível em <https://www.archdaily.com/797505/chi-she-archi-union-architects?ad_medium=office_landing&ad_name=article>. Acesso em 08 de fevereiro de 2021.

2.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO 2

Neste capítulo, foi apresentada uma revisão narrativa de literatura acerca do tema da tectônica. Iniciou-se pela etimologia da palavra, originada na Grécia antiga, e, em seguida, sobre o seu desenvolvimento conceitual, ao longo de diferentes períodos históricos (figura 21). Estes estudos, iniciam a partir do desenvolvimento dos tratados da construção, no século XV, e seguindo até o século XVII – em que o termo foi explorado em meio a um debate filosófico acerca da arte e do construir, motivado pelo surgimento do campo da Arquitetura nas universidades. Do século XVII ao XX, cai no esquecimento, mas começa a ser retomado, no século XX, em meio à crise do movimento moderno e ao resgate dos aspectos táteis e relacionados ao saber fazer, dando origem a uma reinterpretação da tectônica. Por fim, na virada do século XX para o XXI, motivados pelos impactos e potenciais advindos das tecnologias digitais, há uma nova incursão teórica a respeito da tectônica. Ocorre com a finalidade de adequá-la à utilização das ferramentas digitais e explicar a mimese da integração entre estrutura, construção e material em processos formativos em meio digital, conformando uma “tectônica digital”.

Figura 21 – Linha do tempo da teoria da tectônica



(fonte: elaborado pelo autor)

Em meio a estes debates, destacam-se as visões tecnicistas – da “tecnoestática”, de Hübisch, que associa uma moral tectônica ao desenvolvimento científico, da técnica e da tecnologia – e a visão culturalista, de Frampton, de uma moral tectônica associada a um saber-fazer artesanal intrinsecamente associado às condições sociais e

ambientais, proporcionando sua expressão cultural. Esta dissertação, como mencionado anteriormente, busca compreender uma possível integração entre estas duas visões na contemporaneidade – ainda que, na sua apresentação, a perspectiva tecnicista da tectônica seja a partir dos conceitos de Schumacher. Assim, no próximo capítulo, são desenvolvidos os argumentos para tal, com base nesta revisão narrativa.

3. UMA SÍNTESE ENTRE O TRADICIONAL E O DIGITAL

Neste capítulo, são desenvolvidas as questões relativas às teorias da tectônica tradicional e digital, que confluem para sua síntese, em uma proposta que preserve tanto seus fatores técnicos e tecnológicos do digital, quanto os contextuais e culturais associados ao “tectônico”. Para tal, serão debatidos os fatores associados aos aspectos simbólicos regionais, bem como os fatores associados às técnicas digitais, explorando a associação entre ambos os conceitos, que são desenvolvidos em maior profundidade, posteriormente, a partir de estudos de caso.

3.1 O CARÁTER “LOCAL” NA TEORIA DA TECTÔNICA TRADICIONAL

Pode-se afirmar, a partir da revisão narrativa apresentada, que a tectônica tradicional parte de uma moral historicista no século XVIII, que busca por uma “verdade” vinculada ao desenvolvimento da técnica. Já a “tecnoestática”, de Hübch, trata da expressão de novas técnicas e tecnologias, na construção, como sinônimo da expressão de um determinado período histórico. Esta visão perpassa o conceito de tectônica de diversos autores, como Schinkel, Müller e Bötticher. Por outro lado, nesse mesmo período, Semper inaugura uma moral culturalista para tectônica, valorizando o contexto ao qual as edificações são produzidas e condicionando as técnicas a ele. Frente a isto, passa a referir-se à expressão da interação humana com o ambiente na formação das edificações. Ainda que Bötticher tivesse ressaltado a correspondência entre a produção arquitetônica e o local, esta linha de raciocínio é mais bem definida e contundente na concepção tectônica de Semper.

Ao longo do século XX, é possível notar, a partir das obras de Collins e Sekler, um resgate da tectônica sob uma perspectiva pura do “saber fazer”, na utilização dos materiais, da construção e da estrutura, que garantem expressão à edificação e seus componentes construtivos. Essa concepção flerta com uma visão “tecnoestática”, ao passo que se baseia na técnica, negando as condições contextuais ao qual o “fazer” está submetido, ainda que não adote o compromisso dogmático de representar a “verdade” do seu tempo. Por outro lado, também figuram, nesse período, as obras de Frampton, que, por sua vez, conciliam os aspectos do “saber fazer”, derivados do conhecimento da técnica e da tecnologia, a aspectos “táteis”, relativos ao contexto no

qual a técnica e a tecnologia se desenvolvem, em sua visão poética, ou “*poiétika*” da tectônica.

Dentre as visões apresentadas, destacam-se os conceitos de tectônica, na sua perspectiva tradicional, dos seguintes autores:

- a) Bötticher: como uma expressão artística que emerge da relação entre os aspectos simbólicos (artísticos e representativos) e os ontológicos (funcionais e estruturais) de uma edificação, mediada pela ornamentação;
- b) Semper: como uma expressão cultural emergente da produção dos artefatos a partir de uma relação entre materiais naturais acessíveis e o desenvolvimento de técnicas artesanais;
- c) Sekler: como a qualidade de um efeito estético que surge de uma relação premeditada entre a lógica estrutural e a lógica construtiva nas edificações;
- d) Frampton: como um veículo de expressão da sociedade, elaborado em conjunto ao processo de design (no caso, design arquitetônico), associando as capacidades técnicas (representando o “fazer” de forma ontológica) e o estado de desenvolvimento científico das sociedades, enquanto uma “poética da construção”.

Através do embate das visões que acompanham o termo e conceito da tectônica, ao longo de seu desenvolvimento histórico, é possível identificar uma tentativa de moralizar a produção, ou o que é produzido (seja arte, design, construção ou arquitetura), através de um debate relacionado à ética e à estética do construir. No cerne desse debate, figura o processo de formação e materialização de artefatos em diferentes escalas – do ornamento à edificação – a partir de uma perspectiva de integração da estrutura, do material e da construção, como núcleo constitutivo da tectônica tradicional, a partir do qual seu fenômeno estético é perceptível (figura 22). Por tratar-se de um fenômeno estético, a tectônica é apontada, também, como um meio de comunicação, que se expressa através da relação entre a técnica (entendida como condição científica) e o conhecimento (entendido como condição contextual e existencial em que se manifesta o saber), representando um determinado “estado” (temporal, técnico e cultural) societário (figura 23).

Figura 22 – Diagrama esquemático para compreensão da formulação conceitual da tectônica tradicional



(fonte: elaborado pelo autor)

Associadas ao seu conteúdo ontológico, estão as ideias que remetem a sua conexão com o contexto local, enquanto mundo material e social, especialmente manifestadas nas obras de Semper e de Frampton. O primeiro, associa o surgimento da tectônica ao processo histórico de assentamento das comunidades primitivas. Estas trabalharam, de maneira integrada, o material, a estrutura e a construção a partir de sua interação com o meio, os materiais naturais disponíveis, em associação com o seu desenvolvimento cultural, ligado ao aperfeiçoamento de técnicas do artesanato. Para o segundo, a tectônica exprime, de maneira poética, uma representação da sociedade a partir do desenvolvimento da técnica e do meio social ao qual se insere. Parte de uma perspectiva “tátil” da experiência humana e sua trajetória material e temporal no mundo, garantindo, através dessa interpretação sensível, uma carga semântica ao local, que passa a ser “lugar”, e, portanto, passível de transferir significados àquilo que, a partir dele, é produzido.

Assim, pode-se dizer que os fatores que oportunizam a associação com o “local”, na tectônica tradicional, dizem respeito aos significados associados ao “lugar”. Esta associação, seja no seu desenvolvimento cultural, nos materiais e nas condições técnicas locais, isto é, relativa a todos os elementos que possam influenciar significativamente a experiência humana em determinada localidade, a partir do uso holístico de seus sentidos. Assim, a sensibilidade relacionada à vocação de um

designer em produzir significados, é invocada pela tectônica para que seja aplicada, a partir da escala e perspectiva das comunidades locais, interpretados como entes históricos e sociais.

Vale ressaltar que esta interpretação remete a uma posição de valorização da cultura e dos aspectos locais. A partir de elementos associados à identificação com o lugar, operando no nível simbólico, oportunizam que designer seja capaz de os manejar em movimentos de revisão, reforço ou, até mesmo, resgate de símbolos e valores para essas localidades. Ao retratar os fatores locais, a tectônica tradicional passa a ser também uma ferramenta para debater às dimensões éticas, morais e estéticas envolvida no “construir”, em um senso holístico de “fazer” ou “produzir”, associado às artesanias em geral, e não apenas ao nicho arquitetônico.

3.2 A "FORMAÇÃO" NA TECTÔNICA DIGITAL

A tectônica digital é associada diretamente ao surgimento e aos avanços das tecnologias digitais, que, como mencionado anteriormente, são vinculadas a um universo virtual e abstrato, de preceitos antagônicos à materialidade e à tutilidade presentes na tectônica tradicional. Portanto, sua teoria interpenetra, por muitas vezes, métodos e metodologias vinculados ao conteúdo teórico emergente do potencial computacional – como a morfogênese digital – fato que pode ser comprovado através das definições dos teóricos mais expoentes da tectônica digital.

Desta forma, a tectônica digital é para:

- a) Beesley: uma metodologia que aplica as ferramentas digitais no processo de design formando padrões construtivos aplicáveis em diversas escalas;
- b) Leach: a integração da tectônica tradicional ao meio digital por meio da morfogênese digital, valendo-se do *form-finding* digital associado a análises de desempenho;
- c) Rivka Oxman: uma abordagem de design orientado por pesquisa que explora relações tectônicas em modelos gerados com auxílio da morfogênese e da fabricação digitais;
- d) Schumacher: um meio de gerar formas e detalhes tecnicamente engendrados em articulação com um sistema de comunicação social através da integração entre o design digital e a fabricação digital.

Logo, sua definição foi maturando ao passo que, as próprias teorias que tratam das ferramentas digitais evoluíram, ao ponto que seu conteúdo teórico passou a ser associado a uma certa integração entre os processos de formação em meio digital. Isto ocorreu a partir do design digital, a produção de artefatos complexos em termos de fabricação e montagem e da fabricação digital, reproduzindo sua significância como representação de um “saber fazer”, agora associado à Era Digital. Esta interpretação fica mais clara quando se comparam as definições dos autores, de maneira que é possível perceber, embora divergindo na sua finalidade, um núcleo comum em suas propostas: a integração das tecnologias digitais em um processo de design tectônico.

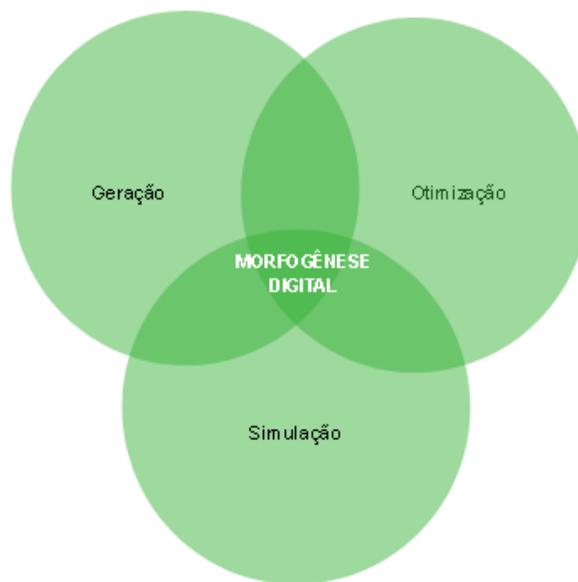
Neste aspecto, Beesley diferencia-se dos demais pelo caráter de “*form-making*” (ou, construção da forma) de sua abordagem, de maneira que o designer obtém o controle do processo e das decisões que impactam na forma final. Porém, subutiliza o potencial computacional em gerar soluções, o que o coloca sua proposta em um estágio de transição do analógico para o digital, em que as ferramentas digitais são utilizadas, mas ainda sob os vícios da lógica analógica.

Leach, Oxman e Schumacher, por outro lado, valem-se de propostas baseadas na morfogênese digital, divergindo, até certo ponto, em sua aplicação. Enquanto Leach vê na tectônica digital a possibilidade de produzir artefatos arquitetônicos baseados na performance estrutural e ambiental, Oxman percebe um novo meio de produção baseado na utilização de novos métodos e materiais a partir de processos de estruturação e materialização auxiliados pelas tecnologias digitais. Firma-os como uma prática investigativa e aberta a uma diversidade de métodos que, não somente os que conduzem a soluções baseadas em performance, como proposto por Leach. Por fim, Schumacher vê um potencial semiótico da aplicação da morfogênese digital na tectônica digital. Defende que se forma um meio capaz, não só de garantir maior rigor técnico na produção de artefatos, do ponto de vista de desempenho (estrutural e ambiental), mas, também, capaz de constituir uma linguagem simbólica para exprimir as necessidades e desejos da sociedade digital, dando origem a um novo “estilo” arquitetônico da era digital.

Dentre as propostas apresentadas, é possível perceber que as capacidades da morfogênese digital, possibilitadas pelo recente potencial das ferramentas digitais de

geração, simulação e otimização (figura 23), surgem como o ponto de inflexão da teoria da tectônica tradicional para a digital, conduzindo processos formativos em *form-finding*, através da programação, a emular as relações tectônicas em meio digital. Desta forma, criam modelos tectônicos virtuais capazes de serem materializados com auxílio da fabricação digital. Logo, são os processos em *form-finding*, sob a égide de simular os processos biológicos de formação, as linhas guias da tectônica digital.

Figura 203 – Diagrama esquemático para compreensão da aplicação da morfogênese digital na tectônica digital



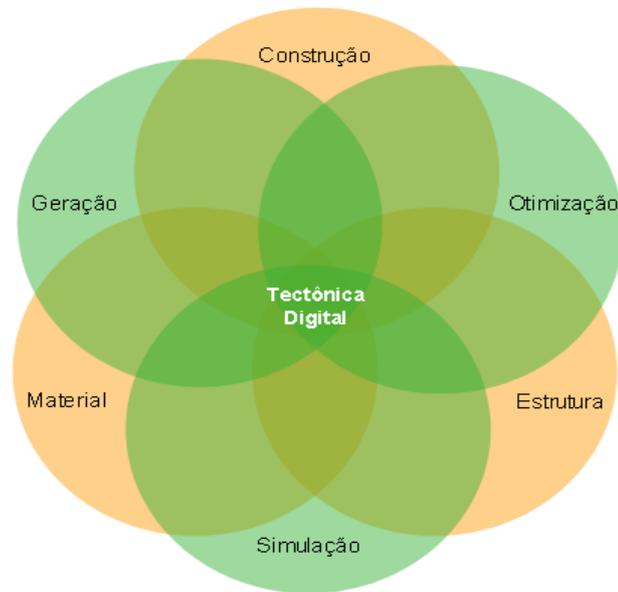
(fonte: elaborado pelo autor)

O que torna as tectônicas tradicional e digital semelhantes é a preservação do pensamento tectônico, baseado na integração entre a estrutura, o material e a construção. Esta perspectiva de integração tem como base o processo de formação da arquitetura vernacular, fruto do artesanato e das tradições construtivas que, gradualmente, transformaram os materiais disponíveis em sistemas construtivos (OXMAN, 2009). Pode-se dizer, a partir do exposto, que esse processo é semelhante à morfogênese, entretanto, disposta em uma perspectiva antropológica – da ação criativa humana, através das gerações, como uma espécie de “evolução natural” das edificações, assim como ocorre nos seres vivos.

A teoria da tectônica digital, nesse sentido, passa a ser mais um estágio ontológico desse processo formativo das edificações, que deu origem a arquitetura vernacular,

mas perpetuada através da morfogênese digital. Assim, a tectônica tradicional mantém seu núcleo teórico, embora passe a ser reavaliada a partir de uma perspectiva mais complexa, tratando os processos de geração da forma (com o auxílio de processos de *form-finding*) considerando a relação entre materiais, estrutura e construção, mas incluindo as capacidades de análise, geração e otimização das ferramentas digitais (figura 24).

Figura 24 – Diagrama esquemático para compreensão da formulação conceitual da tectônica digital



(fonte: elaborado pelo autor)

3.3 UMA SÍNTESE ENTRE O "LOCAL" E O "DIGITAL"

A tectônica digital engendrou-se, inicialmente, apenas no discurso do impacto das tecnologias digitais nos métodos de representação e design do processo tectônico. Relegou, naquele momento, o debate ético e moral a respeito do lugar, privilegiando, em detrimento deste, as questões técnicas do produzir. Nesse contexto, as contribuições de Schumacher foram uma tentativa de trazer a dimensão do lugar, ainda que esta seja interpretada apenas como parâmetro das performances ambientais e sociais. Entretanto, ao comparar-se com o caráter do local na tectônica tradicional, vê-se que essa proposta, apesar de considerar aspectos contextuais, trabalha a dimensão semiológica apenas em termos de “função” do espaço, sem compromisso com os aspectos históricos e culturais de Semper, ou da experiência humana, de Frampton.

Nesse contexto, Yuan adapta o discurso de Schumacher, estendendo sua proposta para responder a aspectos das diferentes culturas regionais, fazendo alusão aos fatores de “localidade”, da tectônica tradicional, expostos por Semper e Frampton. Assim, Yuan propõe que materiais e técnicas construtivas locais sirvam de parâmetros informacionais para a construção dos modelos tectônicos, de modo que os costumes regionais e o patrimônio cultural local sejam traduzidos em informações digitais que guiem o processo de design (YUAN, 2015). A decisão sobre quais aspectos serão transfigurados em parâmetros, para incorporar ao projeto, bem como a maneira com que serão tratados na abordagem de design digital, fica a cargo do projetista, este livre para explorar os diferentes métodos.

3.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO 3

Neste capítulo, foram abordados tanto os fatores que operam no nível simbólico na tectônica tradicional, garantindo um senso de pertencimento local às edificações e demais elementos construtivos, quanto os fatores envolvidos no processo de formação das edificações em meio digital e seus conceitos relacionados. Por fim, foram feitas considerações a respeito de uma síntese entre ambos na formação de modelos tectônicos identificados com características culturais regionais, em uma tentativa de ir além da pura interpretação técnica do potencial das ferramentas digitais, e contextualizando seu uso e apropriação a partir de diferenças culturais, aqui compreendidas como regionais.

Para demonstrar essa associação entre os fatores locais e os métodos de design digital, baseados nos processos de *form-finding* da morfogênese digital, são apresentados, no próximo capítulo, três estudos de caso. Buscam descrever como os fatores formativos da tectônica digital podem interagir com os elementos expressivos do “lugar”, da tectônica tradicional, na elaboração de modelos tectônicos digitais, em concordância com os contextos regionais.

4 ESTUDOS DE CASO

Os estudos de caso, como comentado na sessão de apresentação desta dissertação, foram escolhidos a partir de protótipos oriundos de pesquisas científicas, devidamente publicadas, em um tempo não superior a 10 anos, ou seja, publicações de 2011 até 2021. Como critério de exclusão, buscou-se apenas experimentos que se utilizaram de abordagens de *form-finding* digital cuja inspiração fosse algum aspecto relacionado à cultura local, representada por tipologias vernaculares. Dentre os estudos encontrados, para cada tipo de *form-finding*, foi escolhido um caso representativo. Os casos foram divididos em três tipos, ou seja, os baseados em forma, em estrutura ou em material (OXMAN, 2010). Assim, levou-se em consideração o rigor científico e a quantidade e qualidade das informações relativas ao projeto. Foi tomado como imprescindível que apresentassem a descrição, tanto do *briefing* da pesquisa, como das etapas de geração, análise, otimização e fabricação da forma, bem como descrição das ferramentas digitais aplicadas. Além disso, deveriam estabelecerem clara relação com parâmetros relacionados à fatores de contextos socioculturais regionais.

Dessa forma, os casos escolhidos para representarem o “*know how*” de integração entre os aspectos simbólicos regionais e os processos formativos da morfogênese digital foram, representando o *form-finding* baseado em:

- a) Estrutura: instalação “*Reverse Rafter*”, exposta em 2014, por Philip Yuan e Hua Chai;
- b) Forma: Instalação “*Gridshell*”, exposta em 2017, por Philip Yuan e Hua Chai;
- c) Material: Instalação “*Computational Bamboo*”, exposta em 2018, por Seiichi Suzuki e Evy Slabbinck.

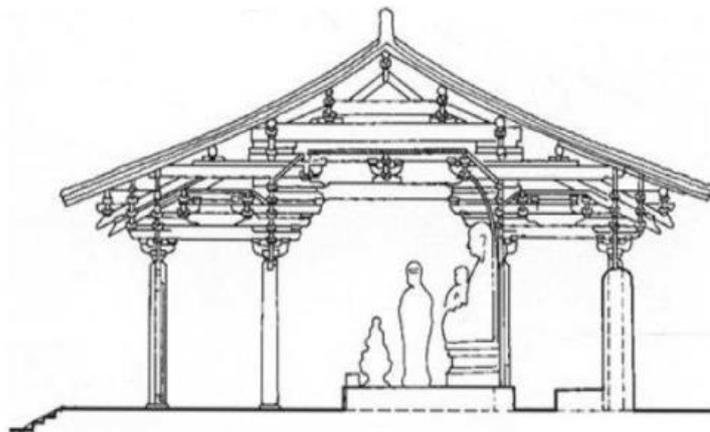
Além disso, estes exemplares assim o foram escolhidos por demonstrarem diferentes escalas de artefatos produzidos, tratando tanto de uma escultura, um elemento arquitetônico e um pavilhão de exposição. A seguir, será apresentado o desenvolvimento de cada um destes casos, seguido do debate a respeito, no próximo capítulo desta dissertação.

4.1 REVERSE RAFTER

O “*Reverse Rafter*” é uma instalação artística, baseada em uma estrutura-escultura, projetada por Philip Yuan e Hua Chai para exposição no evento "DigitalFUTURE Shanghai 2014". O projeto tem como objetivo explorar as possibilidades de reinterpretação tectônica da arquitetura vernacular chinesa. Combina técnicas construtivas tradicionais, em madeira, com uma abordagem de design baseado em desempenho estrutural. O design fundamentou-se no desempenho estrutural, sendo um processo em *form-finding* baseado em estrutura. Este tipo de *form-finding* busca encontrar a melhor relação entre forma e estrutura em um projeto, utilizando o design e a fabricação digitais para simular, calcular e otimizar comportamentos estruturais (YUAN, CHAI; 2015).

Os autores escolheram estudar os princípios estruturais do beiral do telhado tradicional chinês, da dinastia “*Qing*”, como elemento tectônico cultural, a fim de produzir “*insights*” de princípios estruturais que pudessem ser explorados durante a etapa de design da instalação final. Os telhados tradicionais chineses, da dinastia *Qing*, são estruturas em madeira cobertas de telhas cerâmicas, caracterizadas pelos longos beirais em balanço, projetados para suportar o seu próprio peso e o de eventuais cargas de neve. Apresentam certa sofisticação, constituindo uma solução harmônica entre estética e performance (figura 25).

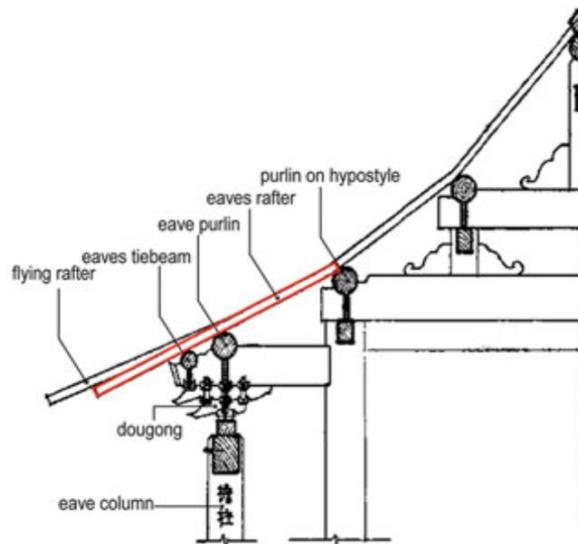
Figura 21 – Seção Ilustrativa da estrutura do telhado tradicional chinês



(fonte: YUAN *et al.*, 2020)

A estrutura do beiral, por sua vez, é suportada por um conjunto de três vigas de madeira: de amarração, periféricas e interiores. As vigas interiores estão associadas a um sistema de colunas, externas e internas à edificação (figura 26). O dimensionamento dessas estruturas é regido pelo tratado construtivo “*Qing Gongbu Gongcheng Zuofa Zeli*”, que reúne os princípios e padrões de manufatura produzidos na dinastia “*Qing*”. De acordo com o tratado, a dimensão do balanço do beiral, entendida como a distância horizontal entre o fim do beiral, em balanço, e a viga de amarração, é um valor variável de até 14 “*doukou*” (unidade de medida da arquitetura tradicional chinesa). Mas o tratado não deixa claro se tal distância leva em conta considerações estruturais. A distância horizontal entre a viga de amarração e a da coluna periférica é um valor fixo de 6 *doukou*. Por fim, a distância entre as vigas da coluna periférica e da interna é um valor fixo de 24 *doukou* (LIANG, 1981).

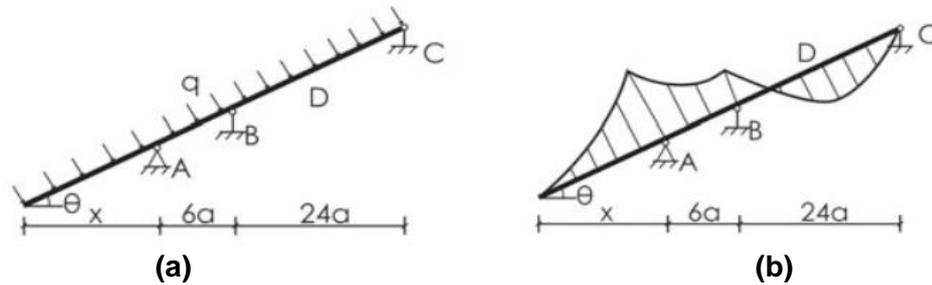
Figura 22 – Detalhes construtivos do beiral em balanço do telhado tradicional chinês da dinastia Qing, ressaltando seus componentes estruturais



(fonte: YUAN; CHAI, 2015)

Visando compreender o funcionamento estrutural dos beirais, estudaram os cálculos de momento fletor atuantes nessas estruturas (JIANG et al. 2011). Perceberam, a partir deste estudo, que a dimensão descrita para o tamanho do balanço pelo antigo tratado condiz, do ponto de vista estrutural, com a distância necessária para que os picos negativos e positivos do momento fletor da estrutura se anulem, garantindo equilíbrio estático ao conjunto (figura 27).

Figura 23 – a) Diagrama estrutural (esquerda); b) cálculo do momento fletor da estrutura (direita)



(fonte: YUAN; CHAI, 2015)

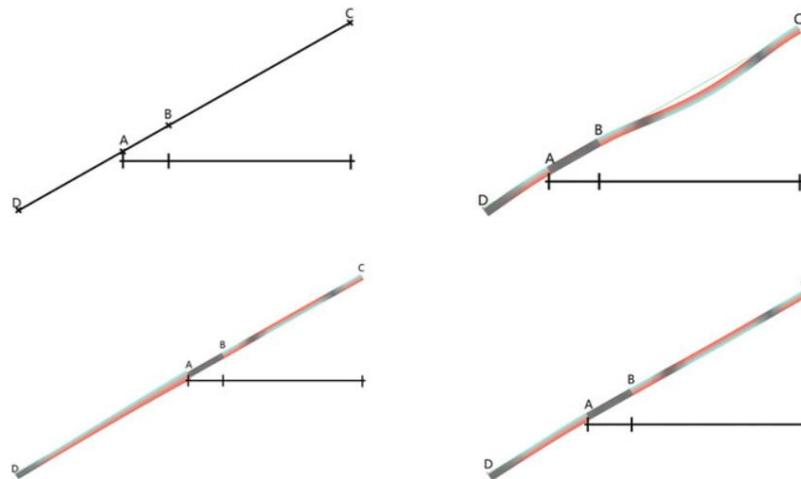
A partir desta constatação, Yuan e Chai (2015) apontam que, apesar de ser possível verificar a racionalidade da distribuição das cargas do beiral, através do cálculo do momento fletor, não era possível, a partir do mesmo, revelar os princípios estruturais que regiam essa relação (YUAN; CHAI, 2015). Dessa forma, decidiram aplicar análises estruturais, proporcionadas por softwares de otimização topológica em meio digital, a fim de realizar explorações dimensionais na estrutura do beiral, e, assim, descobrir outras relações estruturais que pudessem ser analisadas na etapa de design.

Para isso, decidiram utilizar análises de otimização topológica: método de análise de estruturas emergentes, formulado com base na análise de elementos finitos. Esta análise determina a rejeição ou retenção do material estrutural dividindo o seu volume em unidades discretas finitas, de acordo com um algoritmo específico, mostrando uma grande vantagem em encontrar a forma topológica ótima para estrutura, bem como suas dimensões sob certas restrições (YUAN; CHAI, 2015).

O software escolhido por Yuan e Chai, para a análise e otimização topológica da estrutura do beiral do telhado, foi o “*Milipede*”, um complemento desenvolvido para o software “*Rhinoceros3D*”, por Panagiotis Michalatos, em 2014. Esta aplicação é composta por uma biblioteca de algoritmos de análise estrutural rápida para otimização topológica de sistemas elásticos lineares das forças atuantes em pórticos planos (MICHALATOS, 2014). A vantagem no emprego do “*Milipede*” está na sua interface, interativa e dinâmica, que demonstra em tempo real os resultados das análises a partir de diagramas estruturais. Entretanto, os resultados das análises do “*Milipede*” ainda precisam ser devidamente interpretados para que possam ser aplicados de forma racional em uma solução de design.

Para a simulação das deformações, foi necessário produzir um modelo estrutural 3D simplificado da estrutura do telhado, contendo informações do comportamento do material (madeira), das cargas físicas atuantes e das condições de vinculação da estrutura, como restrições ao deslocamento e rotações. Em seguida, durante as simulações (figura 28), foram exploradas diversas dimensões para o balanço do beiral, preservando sua inclinação, para estudar os efeitos globais dessas alterações na estrutura.

Figura 248 – Modelo simplificado para simulação do beiral (acima a esquerda); Estado de equilíbrio quando AD/AC igualam 0.2 (acima a direita); Estado de equilíbrio quando AD/AC equivalem a 0.8 (abaixo a esquerda); Estado de equilíbrio quando AD/AC igualam 0.47 (abaixo a direita)

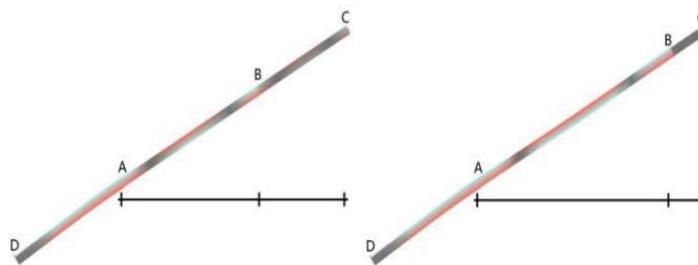


(fonte: YUAN; CHAI, 2019)

Como resultado, ilustrado na figura 28, as simulações demonstraram que a redução do balanço, representada na situação 2, poderia causar uma deformação maior no segmento da haste do balanço apoiada entre a viga da coluna periférica (ponto B) e a viga da coluna do interior da edificação (ponto C). Ao aumentar a dimensão, situação 3, a seção da viga de amarração (ponto A) precisa ser fortalecida para resistir ao aumento no momento fletor. Logo, a proporção apropriada entre ambos deve ser o resultado do equilíbrio entre a deformação do segmento entre vigas das colunas e o tamanho da seção da viga de amarração. Após várias tentativas, concluíram que o valor adequado do balanço poderia ser encontrado quando a razão entre as distâncias AD e AC estivesse em um intervalo entre 0.46 e 0.48.

Em um segundo momento, Yuan e Chai repetiram o mesmo processo de simulação para investigar os efeitos da alteração da posição do suporte do ponto B na estrutura, mas preservaram a razão das distâncias AC e AD no intervalo de 0.46 a 0.48. Como resultado (figura 29), concluíram que a alteração da posição do ponto B não implicava em alterações significativas para o equilíbrio da estrutura (YUAN; CHAI, 2015). Os autores consideraram esses resultados consistentes com os padrões estruturais descritos no “*Qingshi Yingzao Zeli*”.

Figura 29 – Estado de equilíbrio em que AB/AC equivalem a 0.56 (a esquerda); Estado de equilíbrio quando AB/AC é igual a 0.8 (a direita)



(fonte: YUAN; CHAI, 2015)

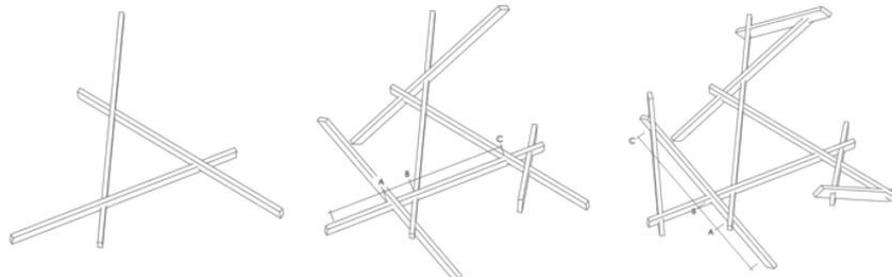
A partir das simulações, os autores deduziram os princípios estruturais que regem a dimensão estrutural da tectônica dos telhados chineses tradicionais da dinastia Qing. Em uma primeira tentativa, aferiram a equivalência da solução estrutural a partir da comparação entre os cálculos estruturais tradicionais e o computadorizado. A consistência entre os resultados dessas análises e os padrões estabelecidos pelo tratado construtivo, que rege os telhados vernaculares chineses, confirmaram o potencial das ferramentas digitais, em associação ao design baseado em desempenho estrutural. Desta forma, pode-se conhecer os princípios estruturais operantes de construções vernaculares e podem servir de parâmetros para alimentar a geração da forma de novas estruturas.

A seguir, na fase de design da instalação, Yuan e Chai propõem a geração de uma estrutura recíproca a partir dos princípios encontrados na etapa anterior. Estruturas recíprocas são sistemas tridimensionais autoportantes com hastes que se suportam mutuamente. Essa classe de estrutura foi frequentemente empregada como suporte para construções de grande comprimento horizontal, como pontes e pavilhões da China antiga (YUAN; CHAI, 2015). Assim, os autores decidem traduzir essas

propriedades para a instalação, mas invertendo a sua lógica usual: de distribuição horizontal, para a vertical, de maneira que cada elemento deve ser sobreposto com dois outros adjacentes.

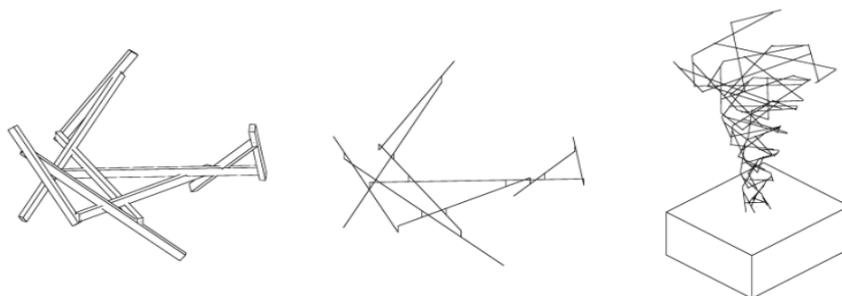
O design da instalação, propriamente, inicia a partir da definição de módulo de estrutura recíproca, composto de três barrotes de madeira sobrepostos e fixados entre si de forma que cada peça seja conectada às outras duas em pontos diferentes e diametralmente distantes entre si. Para remeter aos beirais, estas peças são posicionadas, a uma distância das extremidades do barrote, que se intersectam de maneira a produzir balanços com proporções razoáveis (figura 30). Em seguida, esse processo é repetido, com novos barrotes sendo adicionados à estrutura sob as mesmas condições de equilíbrio dos demais, fazendo com que a instalação evolua em altura e ganhe complexidade, camada a camada, até atingir seu aspecto final (Figura 31).

Figura 30 – O processo de geração de uma unidade baseada nas proporções adequadas



(fonte: YUAN; CHAI, 2015)

Figura 31 – Unidade básica e sua representação simplificada (esquerda e ao centro); modelo simulado (à direita)

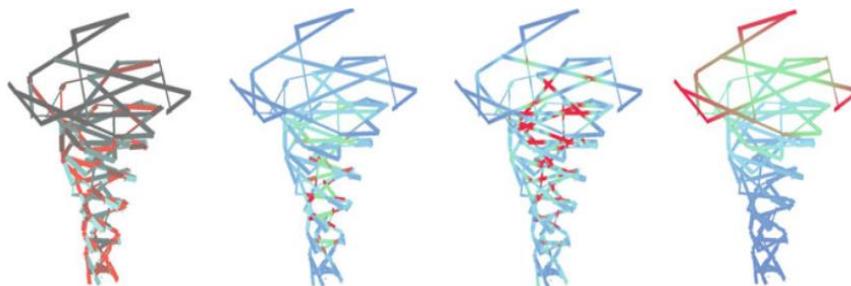


(fonte: YUAN; CHAI, 2015)

No design gerado para instalação, cada elemento comporta-se como as vigas do beiral em balanço do telhado tradicional chinês, carregadas, principalmente, de momentos fletores, e tem a função de suportar o peso de todos os elementos a eles sobrepostos. Para que a configuração final se sustente estruturalmente, os barrotes da parte inferior da instalação devem ter seções maiores que as superiores. Para encontrar as seções mais apropriadas de cada barrote da instalação, foi realizada uma otimização topológica integrada das seções da estrutura com o auxílio do “Millipede”, fornecendo referências para ajuste de projeto. Para a análise, foi necessário construir o modelo 3D para simulação com linhas auxiliares, posicionadas no eixo das conexões, para aproximar o resultado das análises à situação real da estrutura, tendo em vista que o software assume que as conexões entre os elementos são totalmente fixas, resultando em desempenhos completamente diferentes para conexões sobrepostas (YUAN; CHAI, 2019). Desta forma, o fluxo de força no modelo de simulação ficou mais próximo da situação real.

Com estas simulações, foram realizadas otimizações dos tamanhos das seções, a partir do cálculo do desempenho estrutural global em termos dos esforços axial, de cisalhamento, de flexão e quanto a resistência à deformação (figura 33). Após a otimização, as dimensões das seções variaram de forma não linear, seguindo as mudanças do estado de tensão. Levando em consideração o acesso e a economia de materiais, o projeto observou os resultados da otimização e definiu determinadas seções a fim de criar certa padronização. A simulação de desempenho com alimentada considerando-se essas seções e, depois do *loop* de análises, as seções transversais das hastes foram, finalmente, definidas: 90×40; 70×30; 55×20 e 40×20 – dimensões nominais dos barrotes, em milímetros.

Figura 252 – Simulação da performance estrutural com o Millipede - (a) axial; (b) cisalhamento; (c) flexão e (d) resistência à deformação



(fonte: YUAN; CHAI, 2015)

Como desafio para a etapa de fabricação e montagem, a instalação previu o encaixe seco tradicionalmente utilizado como solução para as conexões em estruturas vernaculares chinesas em madeira. Isto implica em ter toda a estrutura montada sem a utilização de nenhum elemento de conexão ou componente de reforço. Além disso, embora a unidade estrutural de cada camada de barrotes da instalação siga a mesma lógica, o comprimento, a seção transversal, a posição da sobreposição e o ângulo de inclinação variam em cada peça, resultando em formas de conexões extremamente complexas. O acúmulo de desvios resultante do processo de fabricação manual tradicional levaria, inevitavelmente, à perda de controle da forma geral. Em função disto, a fabricação digital fez-se absolutamente necessária para o sucesso desse projeto (figura 33). Assim, uma fresadora CNC de 5 eixos foi utilizada para dar a resposta adequada a esta demanda, preservando aspecto global do design (YUAN; CHAI, 2015).

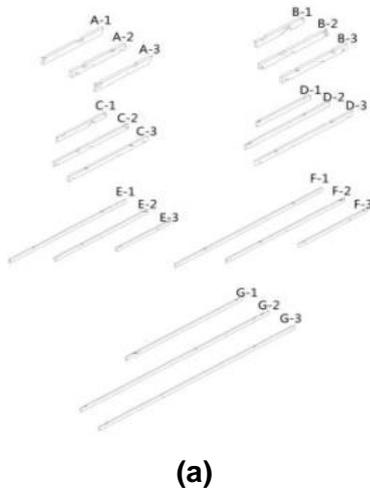
Figura 263 – Fresagem das hastes em fresadora CNC de 5 eixos



(fonte: YUAN; CHAI, 2015)

Uma atenção especial foi dada, também, à etapa de montagem, tendo em vista a complexidade da instalação. A estrutura do “Reverse Rafter” é composta por 63 barrotes divididos em 21 tipos diferentes, quando ao comprimento, variando esta medida entre 1,0 e 3,0 metros. Para organizar a montagem de forma racional, antes do processo de fabricação, foi necessário etiquetar cada barrote, tanto nas plataformas digitais quanto na física (figura 34).

Figura 27 – a) Classificação das hastes e respectiva numeração (à esquerda); b) Conexão entre os diferentes layers da instalação (à direita)



(b)

(fonte: YUAN; CHAI, 2015)

Por fim, a instalação concluída resultou em uma estrutura de 6 m de altura com seu fluxo de força distribuído em barrotes conectados uns aos outros em forma espiral. O raio inferior da estrutura é de 0,5 metros, enquanto o raio superior alcança até 3 metros. Possui um banco em sua base, não apenas para produzir um local de descanso, mas também para contrabalançar o peso da estrutura e resistir à força de tombamento, mantendo a sua estabilidade geral (figura 35).

Figura 285 – Instalação finalizada

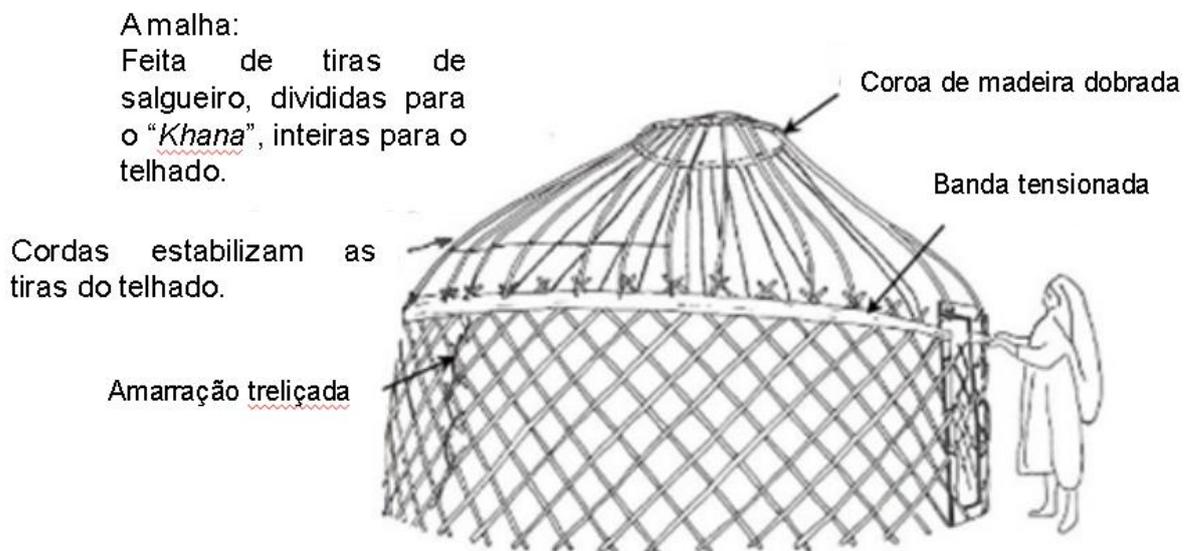


(fonte: YUAN, CHAI; 2015)

4.2 GRIDSHELL

Este projeto é uma iniciativa conjunta, também, dos arquitetos chineses Philip Yuan e Hua Chai para o evento DigitalFUTURES 2017. Foi proposto um pequeno pavilhão para exposição a partir da reinterpretação de estruturas em “*gridshell*” tensionadas. Segundo os autores, o *gridshell* é um sistema construtivo amplamente utilizado em exemplares arquitetônicos primitivos e vernaculares, presente em diversas culturas e etnias, que se caracteriza por originar estruturas leves, a partir de configurações de malhas uniformes (executadas em madeira, ou outro material vegetal, nos exemplares vernaculares, mas sem se restringir ao uso deste material), distribuídas continuamente de acordo com uma forma preplanejada (figura 36). Este sistema é composto por três elementos: a viga de borda, que estrutura a forma da edificação; as ripas da malha estrutural, que garantem o seu preenchimento e, portanto, sua delimitação; e as conexões entre ambas, em material flexível, permitindo a rotação das mesmas, até certo ponto (YUAN, CHAI; 2019).

Figura 296 – Estrutura da tenda tradicional mongol, exemplo de *gridshell* vernacular

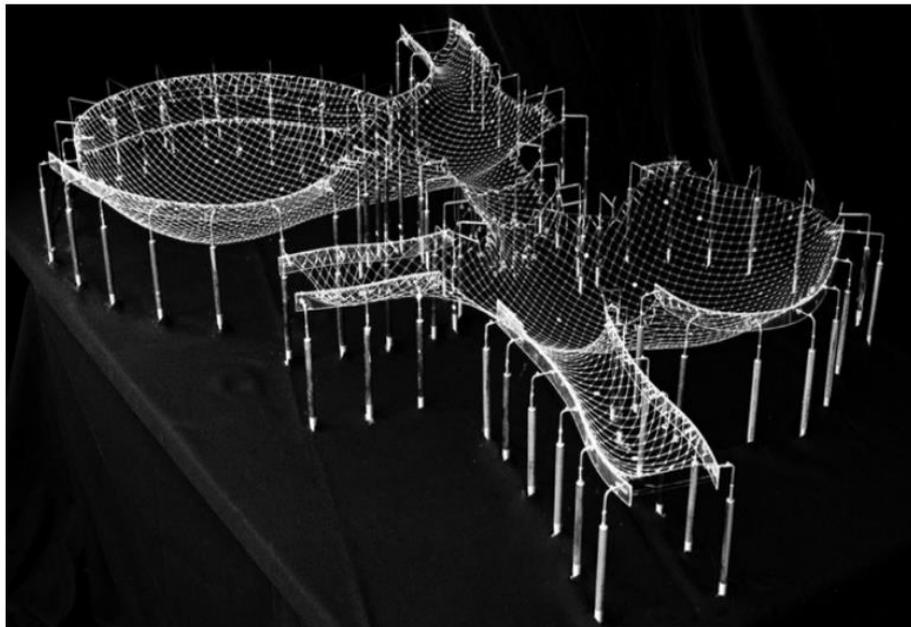


(fonte: SONGEL, 2020, tradução nossa)

A adoção dessas estruturas pela indústria é atribuída ao arquiteto Frei Otto (1925-2015), que desenvolveu larga pesquisa a respeito de inovações estruturais baseadas em elementos e tipologias de construções primitivas e vernaculares. Inspirado nas *gridshells*, Otto projetou e construiu, com sucesso, o “*Multihalle Mannheim*” (figura 37),

na década de 1970, dando origem ao conceito de “*gridshell* tensionada”. Estas, ao contrário de sua versão “não tensionada”, é livre de tensões de curvatura em seu estado inicial (ADRIAENSSENS *et al.* 2014), ganhando força e rigidez por meio da ação da flexão de sua configuração, em dupla curvatura (PONE *et al.* 2013). Por essas características, é utilizada para vencer grandes vãos, aliando alta resistência e baixo consumo de material (LIENHARD *et al.*, 2013). Apesar dessas qualidades, são raramente utilizadas, especialmente pela dificuldade, presente no método tradicional de design, de compatibilizar o padrão da malha estrutural às propriedades do material na estruturação de coberturas em formas livres, dificultando sua viabilidade econômica (YUAN; CHAI, 2019).

Figura 307 – Maquete de estudos de Frei Otto para o “form-finding” do Multihalle Mannheim, a partir de correntes suspensas, garantindo a ausência de tensões de curvatura em seu estado inicial



(fonte: SONGEL, 2020)

Nesse contexto, os autores propõem a construção de um protótipo de *gridshell* em forma livre estruturada, utilizando placas de compensado de espessura de 5 milímetros como material construtivo. Isto deu origem a um pavilhão conceitual do DigitalFUTURES 2017 com o objetivo de explorar maneiras de viabilizar a aplicação de *gridshells* em formas livres complexas a partir do potencial do design e da fabricação digital (YUAN; CHAI, 2019). Para isso, foi utilizado, como estratégia de

design digital, uma abordagem em *form-finding* baseado na forma, a fim de, a partir de uma forma pré-estabelecida, gerar e otimizar a sua malha estrutural tensionada.

Dessa forma, o primeiro passo para a elaboração do pavilhão foi estabelecer a forma a qual a malha estrutural deveria se adequar. Foi feita a opção por uma superfície Enneper¹⁶, cuja complexidade proporcionada pela dupla curvatura de sua forma foi considerada adequada aos objetivos propostos. Assim, foi elaborado seu modelo 3D no *Rhinoceros3D*, com auxílio de seu editor de algoritmos “*Grasshopper*”. A partir disto, foi possível parametrizar a sua topologia, adaptando as dimensões da superfície gerada de acordo com requisitos funcionais próprios do seu uso como pavilhão de exposição. Em adição a isso, foi modelado um negativo em forma circular, na parte superior da superfície, ao qual os autores não referem o motivo específico. Contudo, é possível que tenha sido introduzido por questões estruturais, diminuindo o efeito dos esforços de flexão dos componentes da malha, bem como diminuir as dimensões, o que auxiliaria na viabilidade da fabricação e na redução dos custos com materiais.

Após a definição da forma, foi necessária a compatibilização do padrão da malha estrutural à morfologia da superfície proposta. Para isso, foi utilizado um processo de *form-finding* digital, associado a análises de desempenho estrutural, visando gerar um padrão de malha quadrilateral sobreposto diretamente na superfície. Essa otimização é necessária para garantir que a malha atenda às questões de desempenho do material e foi realizada com auxílio da simulação computadorizada dos esforços de flexão da estrutura (YUAN; CHAI, 2019).

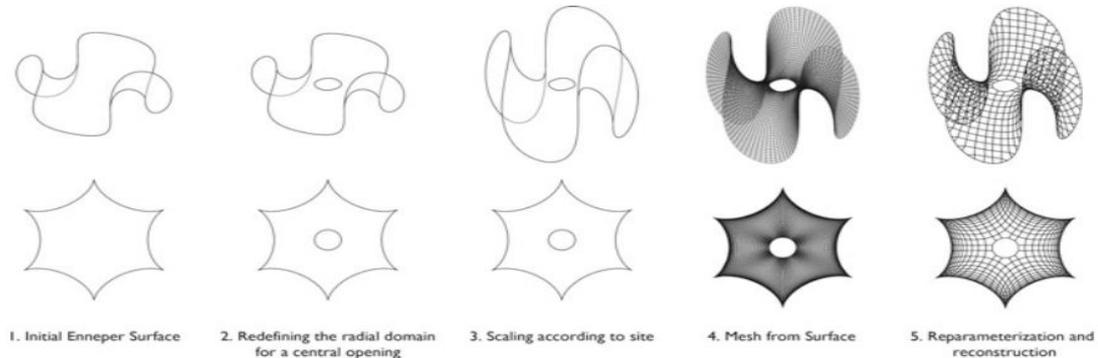
Como método para a aplicação da malha quadrilateral na superfície, optou-se por extrair as linhas principais de curvatura do modelo computacional da superfície de Enneper, com a utilização do *Grasshopper*, e, em seguida, gerar curvas alinhadas a essas a partir da reparametrização¹⁷ dos valores da descrição numérica da superfície, com auxílio do complemento “*Millipede*” (YUAN; CHAI, 2019). Nesse processo, a densidade das curvas de saída pode ser controlada ajustando manualmente o fator de suas escala. Isto permitiu a escolha da densidade mais apropriada para o projeto

¹⁶ A superfície Enneper, em geometria e álgebra diferencial, é a superfície mínima obtida pela parametrização de Weierstrass em determinadas superfícies.

¹⁷ Reparametrização, em projeto auxiliado por computador (CAD), é uma forma de simplificação de parametrizações racionais de superfícies.

(figura 38). Como resultado desse processo, é gerado um padrão de malha ortogonal e relativamente uniforme.

Figura 38 – Geração das linhas de curvatura para compor a gridshell da superfície de Enneper



(fonte: YUAN; CHAI, 2019)

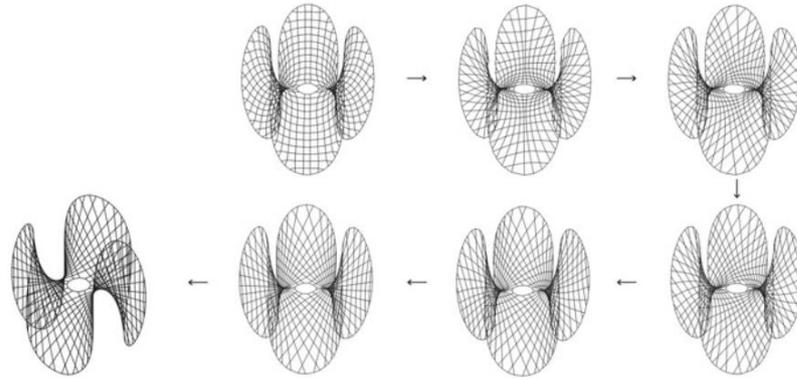
Após a modelagem das curvas que configuram a malha estrutural, foi iniciado o processo de otimização do sistema estrutural (YUAN; CHAI, 2019), dividido em duas etapas. A primeira etapa trata da otimização da curvatura das curvas resultantes do modelo, adequando as mesmas ao comportamento do material. Na segunda, é feita a otimização da seção transversal dos materiais, adequando-a à magnitude dos esforços que precisa comportar, acrescentando o desempenho estrutural do projeto.

As curvas resultantes do modelo da superfície de Enneper correspondem às ripas de compensado que estruturam a *gridshell*. Sendo assim, a otimização das suas curvaturas foi necessária para que fossem compatíveis com as propriedades do material. Logo, para garantir sua integridade estrutural, a curvatura de cada curva do modelo não poderia exceder a curvatura máxima permitida pelo material. Este processo permite, ainda, adequar o padrão da malha estrutural às linhas de tensão naturais da superfície, gerando uma configuração de malha para a *gridshell* com alto desempenho estrutural e baixo grau de curvatura de seus componentes.

Para a otimização, foi utilizado o “*Kangaroo*”, um complemento do *Grasshopper*, cujo motor de simulação de física, “*Live Physics*”, é capaz de simular cargas ambientais e estruturais. Com o auxílio do *Kangaroo*, cada segmento de curva contínua do modelo 3D foi considerado uma viga da malha tensionada informada com as propriedades do material e restrições de movimentação. Assim, foi possível simular a aplicação das cargas de flexão na estrutura, variando a curvatura das vigas, de maneira que estas

“deslizavam” (figura 39) sob a superfície, até o ponto de maneira encontrar uma relação satisfatória entre menores curvatura e resistência às solicitações mecânicas (YUAN; CHAI, 2019).

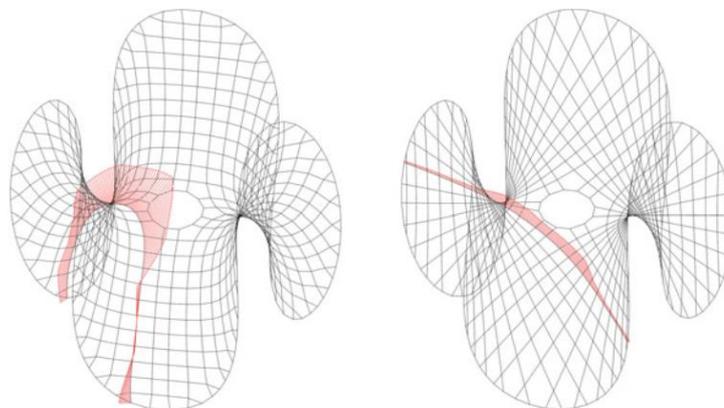
Figura 39 – Processo de otimização da malha estrutural



(fonte: YUAN; CHAI, 2019)

Segundo os autores (YUAN; CHAI, 2019), os valores de curvatura máxima para foram calculados de acordo com diversos ensaios de flexão das placas de compensado de espessura de 5 milímetros, a partir de amostras de 100 x 1000 milímetros. Para quantificar a capacidade de flexão do material foi calculado um coeficiente a partir da razão entre a altura do arco máximo, resultante da deformação do material sob flexão, e o comprimento inicial da peça, resultando em um valor de 0,34. Na sua configuração inicial, o modelo apresentava um coeficiente de 0,416 para a mesma razão, ou seja, superior ao comportado pelo material. Após o processo de otimização, esse valor passou a ser de 0,151, demonstrando a eficácia do procedimento (figura 40).

Figura 310 – Análise computacional comparativa da curvatura das curvas da malha estrutural da *gridshell* antes da e depois da otimização

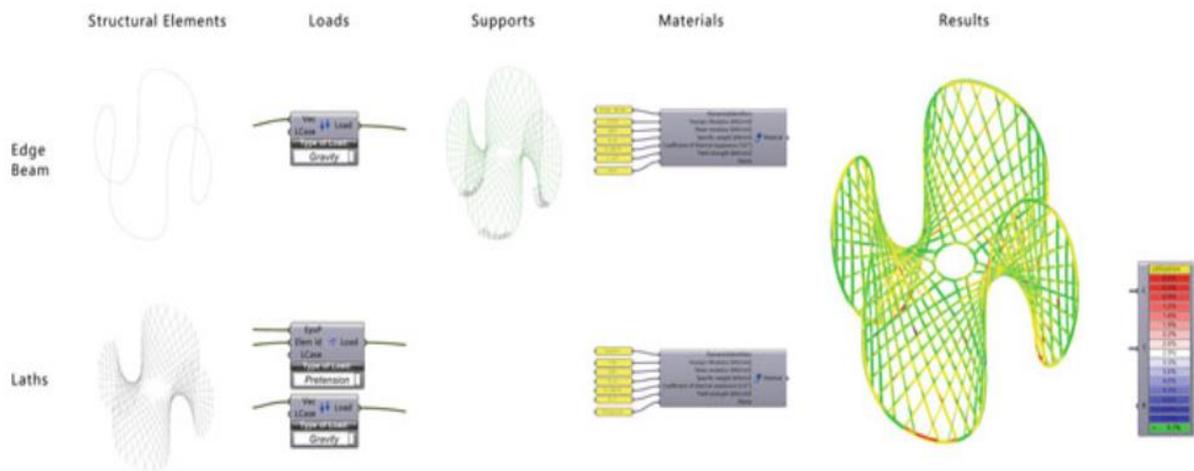


(fonte: YUAN; CHAI, 2019)

Após a otimização da curvatura da malha, foi realizada, também, a otimização da seção transversal dos seus elementos estruturais (viga de borda, ripas e conexões). Para isso, foi realizado um modelo de análise de elementos finitos com auxílio do complemento “*Karamba*”, para o *Grasshopper*. Tomando o modelo digital e as propriedades do material de diferentes componentes como entrada, as seções transversais das ripas e da viga de borda foram otimizadas de acordo com a eficiência de utilização do material.

Para a simulação, as ripas foram consideradas como pré-tensionadas (Figura 41), já com esforços de flexão atuantes sobre elas (YUAN; CHAI, 2019). Essa segunda etapa de otimização teve como objetivo tornar o sistema estrutural do protótipo mais eficiente do ponto de vista da utilização dos materiais, aproveitando o potencial do design digital em gerar seções de componentes adequadas para os esforços que comportam individualmente, e da fabricação digital na produção flexível de componentes complexos necessárias para sua fabricação.

Figura 321 – Simulação estrutural e processo de otimização com auxílio do plugin “*Karamba*”



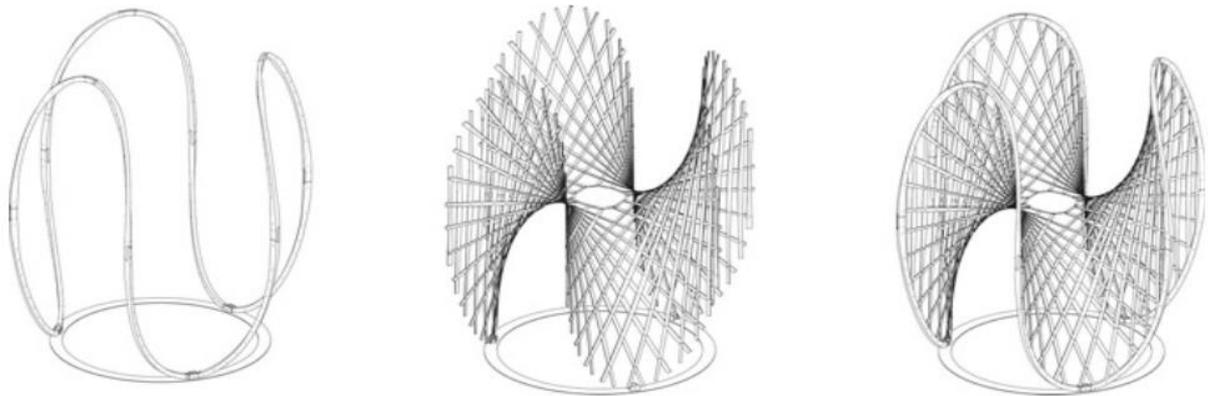
(fonte: YUAN; CHAI, 2019)

Os resultados da simulação puderam ser observados tanto a partir de gráficos de gradiente, expressando os valores dos esforços de flexão de cada estrutura, quanto através da simples conferência dos valores de saída dos esforços correspondentes a cada parâmetro geométrico da estrutura. A eficiência estrutural do material foi o parâmetro utilizado para determinar as seções transversais. Desta forma, seções

transversais maiores foram aplicadas onde os esforços foram mais altos e, as menores, onde os esforços foram maiores.

A seção transversal inicial da viga de borda era de 80 x 100 milímetros e a largura das ripas, de 70 milímetros. Após a otimização, as dimensões da seção transversal variaram entre 60 x 90 milímetros e 90 x 20 milímetros. As dimensões das ripas variaram entre 40 e 90 milímetros. O processo de otimização melhorou o desempenho da estrutura, criando uma conexão direta entre a forma dos componentes e as forças internas da estrutura (figura 42) (YUAN; CHAI, 2019).

Figura 42 – Sistema estrutural da Gridshell após a otimização: à esquerda, as vigas de bordo; ao centro, as ripas; à direita, a estrutura completa



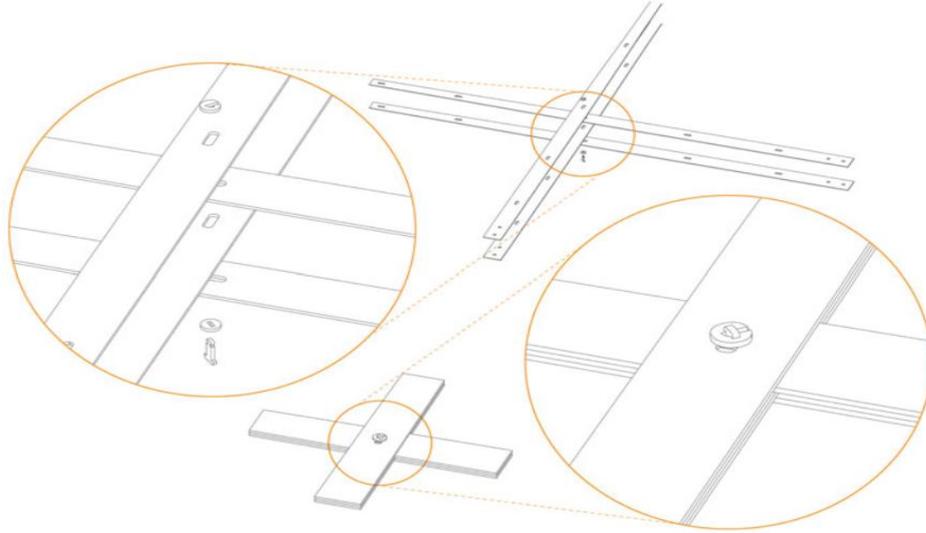
(fonte: YUAN; CHAI, 2019)

Diferentes métodos de fabricação digital foram utilizados para a produção de cada componente do protótipo: A viga de borda foi idealizada como uma peça maciça em madeira laminada colada (MLC), para resistir à ação de flexão. As ripas foram produzidas em chapas de compensado de 5 milímetros, empregando um sistema de dupla camada desenvolvido por Frei Otto. Para as conexões, foi formulado um sistema de encaixe macho-fêmea seguindo o mesmo princípio do sistema de dupla camada, a fim de trazer maior conveniência tanto na sua instalação quanto remoção – figura 43 (YUAN, CHAI; 2019).

Para a produção das ripas, estas foram perfiladas em um mesmo plano, incluindo marcações com informações de localização das conexões e larguras das seções. Em seguida, foi feita a diagramação das mesmas dentro dos limites das dimensões de uma placa de compensado (1220 x 2440 milímetros), totalizando um número de 38

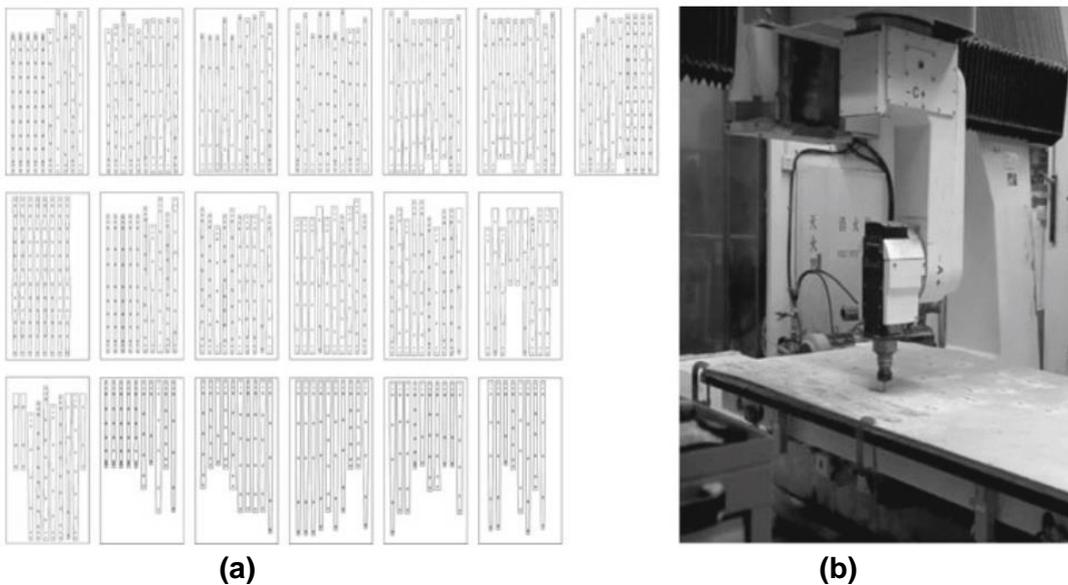
placas, que foram fresadas por uma fresadora CNC de 5 eixos em 2 dias de produção – figuras 44a e b (YUAN; CHAI, 2019).

Figura 43 – Sistema das juntas em camada dupla



(fonte: YUAN; CHAI, 2019)

Figura 44 – a) Diagramação das ripas nas placas de compensado com auxílio do software CAM; b) processo de usinagem das mesmas com auxílio de uma fresadora CNC



(a)

(b)

(fonte: YUAN; CHAI, 2019)

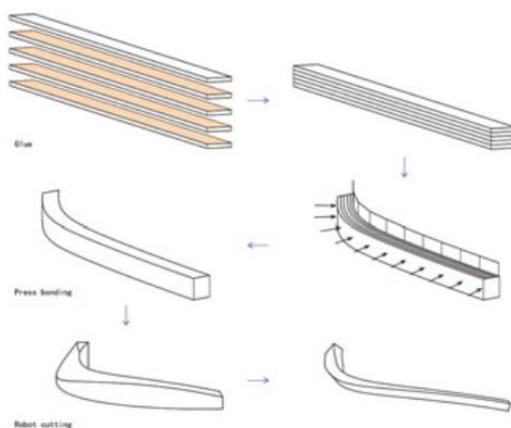
A fabricação da viga de borda em MLC, por outro lado, em razão da sua geometria em curva espacial foi o principal desafio da etapa de fabricação, pois, ao contrário de

vigas curvas planas, facilmente produzidas em fábrica, estas são mais complexas, possuindo curvaturas em mais de uma direção. Para resolver esta questão, foi necessário adotar como estratégia de fabricação digital o corte robotizado com uso de serra fita acoplado a um braço robótico (YUAN; CHAI, 2017).

A serra fita foi escolhida por ter uma lâmina de largura menor que uma a serra circular, por exemplo, o que torna possível o corte de superfícies rígidas espaciais. A utilização do braço robótico, por outro lado, facilita o processo de corte, dispensando a utilização de gabaritos complexos que seriam necessários para estabilizar o caminho de corte no método convencional, tornando esse processo mais preciso. Para que isso fosse possível, foi necessário modificar uma serra fita de 14 polegadas, removendo peças desnecessárias e substituindo seu motor por um de 15.000 watts, de maneira a reduzir o seu peso, aumentar sua faixa e potência de corte (YUAN; CHAI, 2019).

Para tornar a peça de madeira maciça, que originaria a viga de borda do projeto compatível à gama de corte, foi necessário dividi-la em doze segmentos, produzidos em fábrica, para seu posterior corte robótico. Como a forma final do protótipo é centro simétrica, os doze segmentos resultantes apresentaram apenas duas formas diferentes entre si. Em seguida, foi desenvolvido um algoritmo genético para encontrar o menor volume que pudesse acomodar as vigas, bem como reorientar seu ângulo de projeção para o plano horizontal, facilitando o processo de fabricação. Por fim, foi extraído o contorno externo do modelo 3D das vigas, ao qual se acrescentou 1 centímetro de folga externa de tolerância para a fabricação (figura 45).

Figuras 335 – a) Processo de produção das vigas de borda, à esquerda; b) Produção com auxílio do braço robótico com a serra fita acoplada, à direita



(a)



(b)

(fonte: YUAN; CHAI, 2019)

No processo de fabricação, dada a geometria complexa das vigas, foi necessário descartar o uso de mesas de fixação tradicionais e desenvolver molduras de madeira que se adequassem a cada tipo de viga. Em seguida foi verificada a posição exata do feixe de corte no *Grasshopper*, com auxílio do complemento “*Kuka Prc*”, capaz de projetar e simular os movimentos e caminhos de operação de braços robóticos (figura 46). As vigas foram então fixadas aos suportes, com cliques de madeira, e fresadas em sua porção superior, sendo o mesmo processo repetido, em seguida, com o lado inverso da viga (figura 47). Durante o processo de fabricação, a velocidade do robô foi alterada continuamente de acordo com a espessura a ser cortada, durando cerca de 10 dias para que ficassem prontas (YUAN; CHAI, 2019).

Figuras 46 –a) Corte robótico com serra fita b) Simulação dos movimentos do robô com o Grasshopper3D, a partir do plugin Kuka Prc



(a)



(b)

(fonte: YUAN; CHAI, 2019)

Figura 347 - Corte robótico com serra em fita acoplada em funcionamento



(fonte: YUAN, CHAI; 2019)

Para auxiliar na montagem, as vigas de borda e as ripas foram etiquetadas, informando seu posicionamento. Por conta das estratégias de fabricação digital, o processo de montagem no local da estrutura em grande escala foi simplificado, resultando em praticidade na sua execução: Primeiro, os doze segmentos da viga de borda foram fixados entre si e dispostos em sua posição final. Em seguida, as ripas foram fixadas, uma a uma, manualmente, em processo semelhante à tecelagem, incluindo suas conexões. A montagem contou com cinco pessoas e levou menos de vinte horas para ser concluída (figura 48) (YUAN; CHAI, 2019).

Figura 48 – Pavilhão finalizado



Fonte: YUAN, CHAI; 2019.

4.3 COMPUTATIONAL BAMBOO

Este estudo de caso trata dos resultados do projeto e construção do “*Computational Bamboo*”, uma instalação artística de demonstração do potencial da flexão ativa a partir das propriedades elásticas do bambu, construído e exposto no “*Museo Interactivo de Ciencia*” (MIC), em 2018 na cidade de Quito, no Equador. A estrutura

em questão foi desenvolvida no contexto do programa “*Global Summer School*” (GSS), promovido pelo “*Institute for Advanced Architecture of Catalonia*” (IAAC), e, organizado em colaboração com o “*Institute of Building Structures and Structural Design*” (ITKE), vinculado à “*University of Stuttgart*”, na Alemanha, em conjunto com a em conjunto com a “*Pontificia Universidad Católica del Ecuador*” (PUCE).

O GSS é uma plataforma que investiga as implicações da aplicação de técnicas emergentes no ambiente construído, a exemplo da robótica, das simulações de desempenho, da computação física, do design paramétrico e da fabricação digital. Anualmente, o GSS promove um evento que reúne equipes internacionais em diferentes cidades, ao redor do globo, para desenvolver projetos de pesquisa e aprendizagem a partir de uma agenda comum, baseada na diversidade e nas condições regionais da localidade das equipes. Por conta disto, os participantes são imersos em um laboratório internacional para a pesquisa avançada de aplicações de novas tecnologias a partir de hipóteses de perspectiva local em um ambiente de auxílio e troca de conhecimentos a nível global.

O Workshop de 2018, em Quito, foi conduzido por Evy Slabbinck e Seiichi Suzuki (pesquisadores do ITKE), teve como objetivo discutir estruturas leves e seu papel para o desenvolvimento sustentável do ambiente construído, através da formação de um sistema estrutural pela exploração topológica de elementos de bambu em flexão ativa. A utilização da flexão ativa na produção de estruturas mais resistentes e econômicas, que consiste na prática de curvar materiais para aumentar sua resistência interna, é uma estratégia amplamente utilizada em construções vernaculares, especialmente na Ásia e na América do Sul (LIENHARD et al. 2013). As construções vernaculares sul-americanas, por exemplo, são reconhecidas pela diversidade de tecnologias de construção dos povos indígenas, reflexo do potencial da biodiversidade e dos biomateriais dessa Região. Estes constituem uma valiosa herança cultural a respeito do emprego da madeira e do bambu na construção, a exemplo da casa “Kamayurá” (figura 49), pertencente à etnia Tupi-Guarani, presente no território brasileiro (SEIXAS et al. 2017).

Figura 35 – Fotografia de um exemplar da casa “Kamayurá”



(fonte: SUZUKI *et al.*, 2020)

O conceito do “*Computational Bamboo*” foi elaborado a partir da ideia de reinterpretar, computacionalmente, os princípios de design vernacular com bambu, utilizando a deformação elástica do material como estratégia (SUZUKI *et al.* 2020). O bambu (“*Phyllostachys aurea*”), é uma gramínea de camada externa dura e de interior macio, o que a torna tão resistente quanto a madeira, mas muito mais leve e flexível. Esse material apresenta alta resistência à tração e resistência à flexão média duas vezes maior que a maioria das madeiras estruturais convencionais (MINKE, 2012), sendo classificado como um material ideal para flexão ativa (LIENHARD, 2014). Entretanto, suas propriedades heterogêneas constituem o maior desafio para seu emprego, dificultando o controle do comportamento estrutural e geométrico das estruturas que empregam este material (SUZUKI *et al.* 2020).

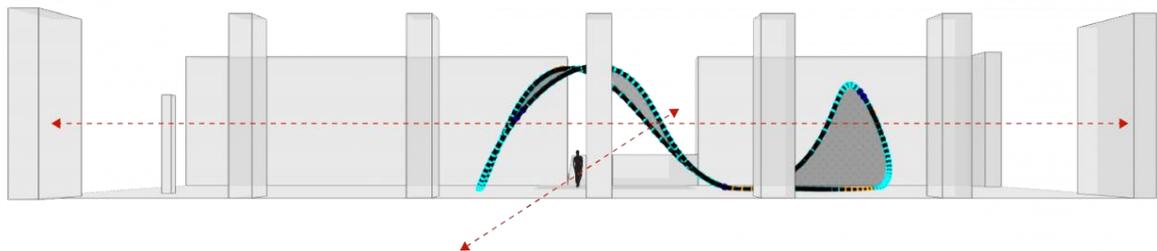
Tendo em vista os potenciais e as dificuldades no trato do bambu, os idealizadores do projeto optaram por explorar as propriedades de flexão do material através de uma estratégia de *form-finding* digital baseado em material, fazendo com que a forma e aspecto final da instalação do museu fosse gerada diretamente do potencial de flexão do bambu em ambiente digital. Assim, a forma do museu foi modelada a partir da exploração topológica de “arcos de compressão curvos”¹⁸, tradicionalmente

¹⁸ Como foram chamadas, por Frei Otto, as estruturas elásticas originadas pela flexão do bambu.

empregados na construção vernacular. Por se tratar de uma instalação a ser locada no MIC, os projetistas consideraram, como primeiro passo, as restrições dimensionais e funcionais do local de exposição no Museu: um salão de 7,5 metros de largura por 20 metros de profundidade utilizado como uma área de circulação entre outros três ambientes de exposição, portanto sem uso específico (SUZUKI et al. 2020).

Definida a configuração e uso do espaço, foi decidido realizar uma intervenção no local a partir de uma membrana multifuncional, desdobrando-a tanto horizontalmente quanto verticalmente, demarcando a área de circulação e proporcionando uma barreira física e visual, juntamente de assentos, a constituir uma área de estar. A partir das dimensões do salão, estimou-se que esta estrutura teria dimensões máximas de 15,5 m de comprimento, 7,5 m de largura e 4,0 m de altura em seu ponto mais alto (Figura 50).

Figura 50 – Conceito arquitetônico regulando os fluxos e dimensões da intervenção

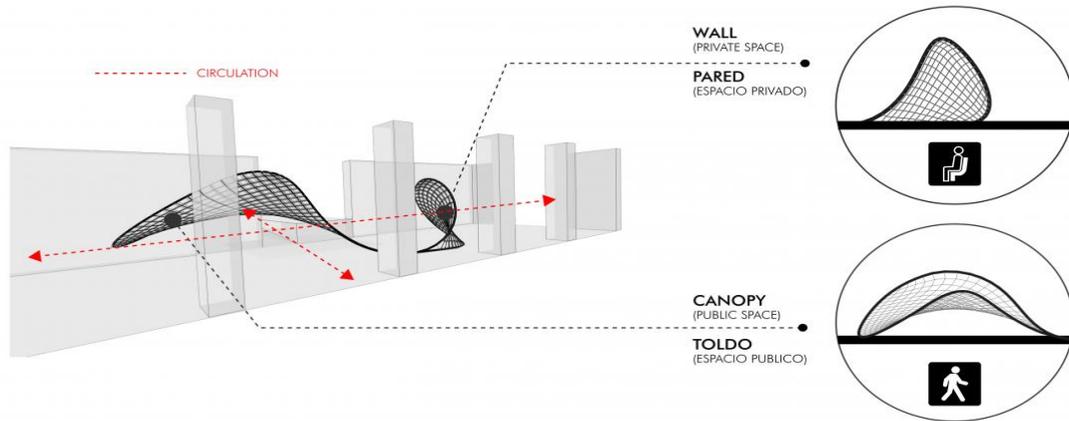


(fonte: SUZUKI *et al.*, 2020)

Após as considerações dimensionais, foi necessário definir a materialização da membrana. Neste ponto, foi proposta a utilização do bambu tanto como material da viga de borda curva, que delimita a estrutura, quanto da sua trama reticular de preenchimento (figura 51). Para adequar a membrana aos usos, foi previsto que a viga de borda interceptasse a si mesma, em algum ponto, de tal maneira a dividir a estrutura em um par de “*loops*” fechados. Assim, cada um destes corresponderia a uma função específica do projeto, diferenciados entre si por diferentes densidades de preenchimento da trama, sendo mais densa na área de estar, proporcionando certa privacidade (SUZUKI et al. 2020). Por fim, foi definido que a malha reticular seria

inspirada por técnicas artesanais de cestaria com bambu, reforçando a intenção projetual de aliar o potencial computacional aos aspectos da cultura local.

Figura 36 – Definição das diferentes funções da membrana, de acordo com seus loops

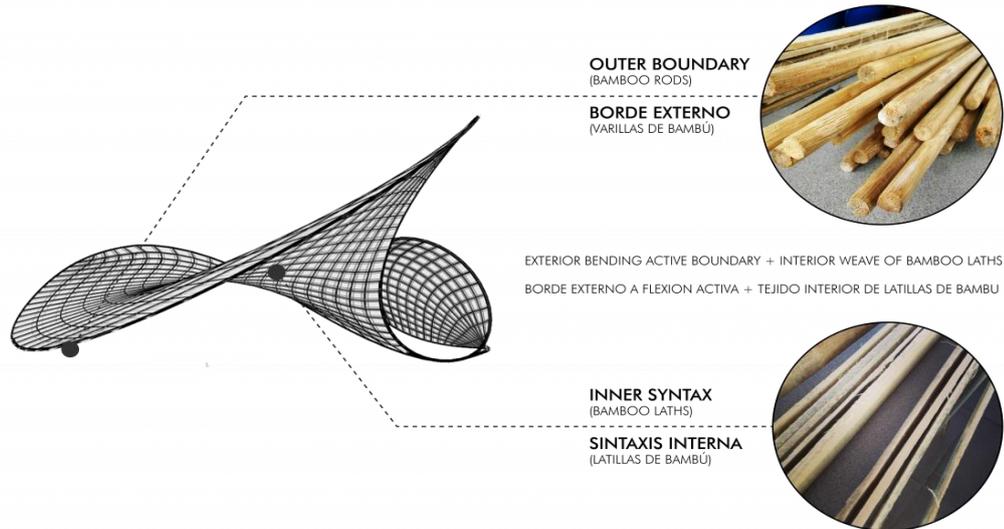


(fonte: SUZUKI *et al.*, 2020)

Assim, foram adquiridas meias canas de bambu com 3 metros de comprimento, que foram subdivididas por cortes transversais em hastes e ripas, que proporcionaram maior desempenho à flexão e melhor aproveitamento do material, uma vez que nessas configurações há um aumento das propriedades elásticas, além de permitir a sua torção, promovendo mudanças geométricas espaciais que permitem um encaixe plano, garantindo maior profundidade estrutural e rigidez geométrica (SUZUKI *et al.* 2020). As hastes foram destinadas à viga de borda, e, as ripas, à trama reticular (figura 52). Para assegurar que a curvatura das ripas acompanhasse a curvatura da membrana, foi projetado, ainda, um anel central de amarração da estrutura no topo desta, aumentando a rigidez global da estrutura.

Tanto as hastes, quanto as ripas de bambu, foram produzidas a partir de cortes paralelos de canas de 3 metros de comprimento, para obter um comprimento comum para todas as peças. As ripas foram produzidas com seção transversal retangular de espessura de 1 x 5 centímetros, e, as hastes, com seção transversal circular de 1 centímetro de diâmetro, a partir da subdivisão das ripas. Ambas foram posteriormente lixadas para retificação a homogeneização do seu perfil (figura 53). Os cortes foram realizados em local próximo ao museu, com serras circulares e lixadeira industriais.

Figura 37 - Definição da configuração material da membrana



(fonte: SUZUKI *et al.*, 2020)

Figura 38 – a) Corte com serra circular, à esquerda; b) Lixamento com lixadeira industrial, à direita



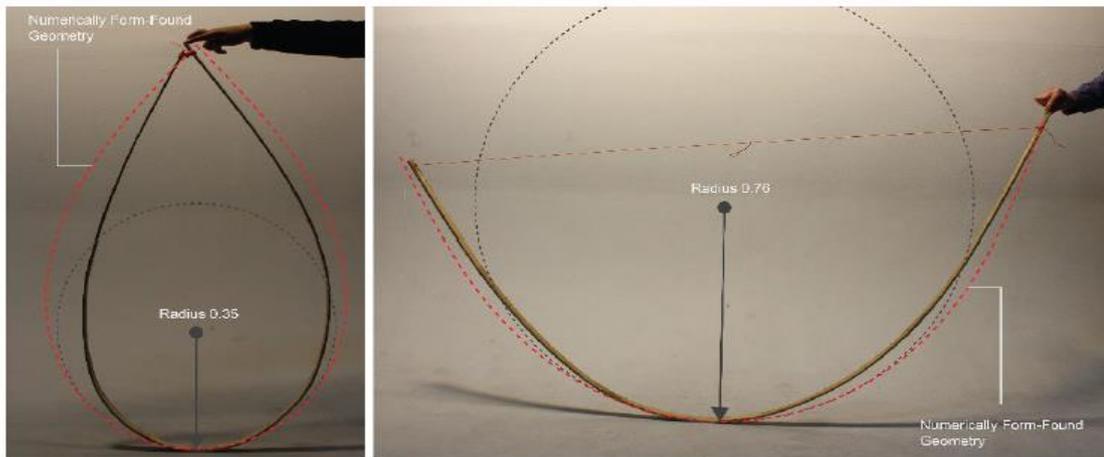
(fonte: SUZUKI *et al.*, 2020)

Em seguida, foi planejado um fluxo de trabalho para a geração da forma da estrutura em quatro etapas diferentes: ensaio dos materiais, geração da viga de borda em forma livre, modelagem da trama de preenchimento e otimização global da estrutura (SUZUKI *et al.* 2020). Como a geração da forma prescinde, neste caso, à exploração do potencial da flexão ativa do bambu, foi empregado um processo de *form-finding* baseado em material.

Segundo os idealizadores do “*Computational Bamboo*” (SUZUKI *et al.* 2020), os participantes não tiveram acesso a equipamentos profissionais de ensaio de materiais para a primeira etapa de geração. Isto ocorreu, porque o período de duração da oficina

era curto, duas semanas, de maneira que as flexão e torções máximas permitidas pelo material, nas configurações escolhidas, foram avaliadas manualmente, sendo submetido à flexão até o ponto de falha para que fosse possível determinar o seu raio de curvatura (Figura 54).

Figura 54 – Teste empírico do material, ao qual se determinou o raio máximo de curvatura do material



(fonte: SUZUKI *et al.*, 2020)

O conhecimento empírico adquirido nessa etapa exploratória serviu, então, para calibrar as propriedades do material na simulação computacional de geração da forma da viga e da trama. Este passo foi necessário pois as propriedades do material variam muito em relação às suas condições de produção. Assim, os valores pré-fixados, em softwares computacionais, pode divergir significativamente do comportamento do material na realidade. Para minimizar as chances de isso acontecer, decidiu-se operar os modelos digitais com as propriedades mais próximas daquele material que tinham à disposição.

Para verificar se os valores do material estavam próximos dos seus valores padrões no software, o resultado da forma da linha elástica¹⁹, dos ensaios manuais, foram comparados com a forma da linha elástica resultante de análises computacionais²⁰:

¹⁹ A linha elástica é a configuração geométrica de deslocamento vertical dos pontos situados no eixo longitudinal de uma viga, nesse caso considera como as hastes e ripas de bambu.

²⁰ O software utilizado para essas análises não foi especificado, mas, tendo em vista que o Grasshopper em associação ao Rhinoceros é utilizado nas etapas posteriores, e que estes permitem esse tipo de análise, é suposta a sua aplicação nessa etapa em conjunto com plugins de análise de desempenho estrutural, como o *Karamba*, mesma configuração citada nos estudos de casos anteriores nesta dissertação.

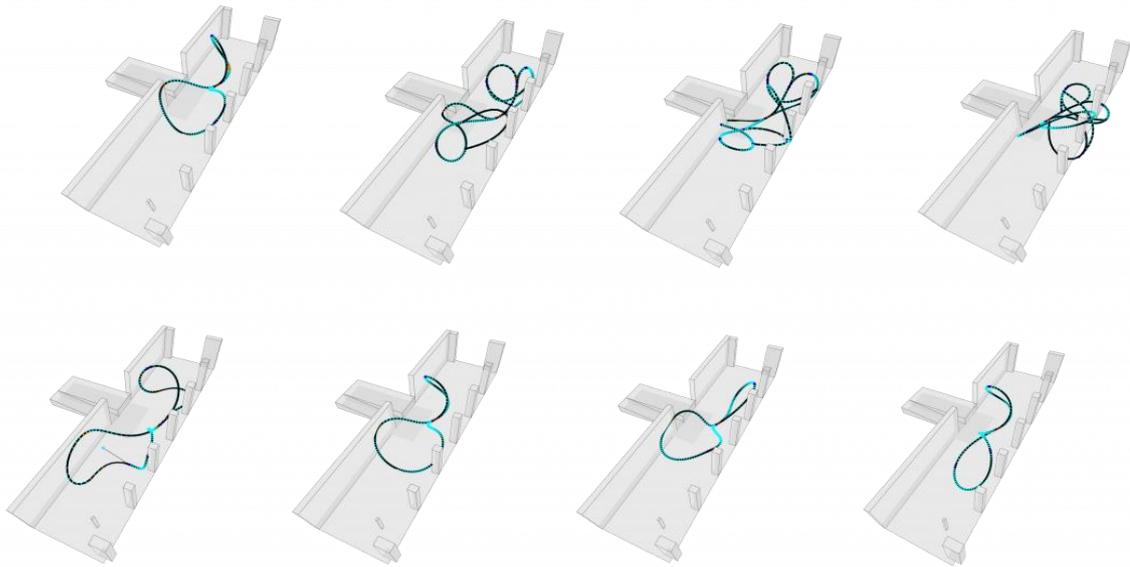
estas considerando as propriedades padrões para o material. O resultado da comparação entre as análises demonstrou uma aproximação satisfatória entre ambas, de maneira que, as informações empíricas foram consideradas válidas, e, portanto, escolhidas para informar o processo de design computacional (SUZUKI et al. 2020).

Para a simulação do comportamento elástico do material, bem como a geração da forma da viga de borda, foi utilizado o software “*ElasticSpace*”, um complemento desenvolvido para o *Grasshopper*, no qual foi possível gerar e refinar gradualmente a geometria e arranjo topológico da estrutura. Segundo os desenvolvedores da aplicação, Seiichi Suzuki e Jan Knippers (2017), este aplicativo foi desenvolvido especialmente para o *form-finding* numérico de estruturas têxteis híbridas, caracterizadas por geometrias complexas em forma livre, com base na manipulação contínua de espaços topológicos de forma interativa e em tempo real (SUZUKI; KNIPPERS, 2017).

Desta maneira, o projetista é capaz de interagir com o modelo durante a geração da descrição mecânica dessas estruturas, em equilíbrio estrutural, modificando forças, parâmetros, coeficientes e restrições do sistema até encontrar uma forma satisfatória (SUZUKI; KNIPPERS, 2017). Logo, a sua utilização permitiu simular a experiência empírica de manipular os materiais físicos, explorando formas estruturais, facilitando este processo por parte dos participantes da oficina que não tinham experiência com as ferramentas avançadas de modelagem computacional, permitindo a eles explorar a geometria topológica da viga de borda, com o uso do *ElasticSpace*, em um processo de *form-finding*, em tempo real (SUZUKI et al. 2020).

Durante a etapa de exploração, foi modelado o perfil da viga de borda em ambiente digital através de polilinhas submetidas à simulação dinâmica de cargas físicas ambientais, de maneira interativa: adicionando, excluindo e conectando as polilinhas em busca de uma forma final (SUZUKI et al. 2020). Embora o conceito da membrana tenha sido previamente definido, a simulação da forma da viga desconsiderou qualquer tipo de pré-condição topológica, garantindo que a evolução da mesma fosse gradativamente conformada ao longo da modelagem, em caráter exploratório, até chegar a uma solução satisfatória (figura 55) (SUZUKI et al. 2020).

Figura 395 – Processo de exploração da forma da viga de borda, com auxílio do ElasticSpace

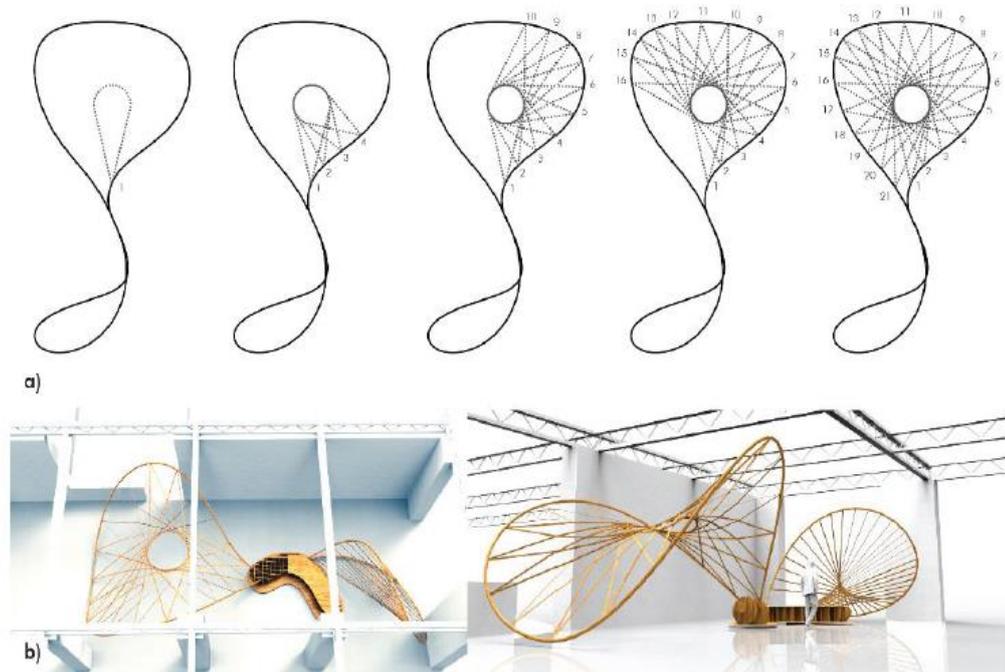


(fonte: SUZUKI *et al.*, 2020)

Após a definição da forma da viga de borda, foram conduzidos estudos para a geração dos padrões de preenchimento da trama da membrana. Ao contrário dos requisitos de modelagem da primeira, nos quais a liberdade geométrica e topológica era desejada para explorar sua relação com o espaço de exposição, optou-se por gerar a malha de preenchimento, dentro dos limites da viga de borda, a partir de um controle mais rígido do processo de modelagem, utilizando um processo de construção da forma (“*form-making*”) (SUZUKI *et al.* 2020).

Assim, foram modelados dois padrões diferentes de malha por meio de algoritmos, um para cada *loop* da estrutura, que, por sua vez, corresponde a um uso da membrana. Cada um desses padrões foi desenvolvido com estratégias diferentes resultando em sintaxes específicas. Para a “cobertura”, o padrão de preenchimento foi projetado parametricamente, com o uso do *Grasshopper*, a partir de linhas originadas pela conexão de pontos posicionados ao longo da curva e um ponto atrator posicionado no interior do *loop* (figura 56) (SUZUKI *et al.* 2020). O padrão da “parede”, por outro lado, foi elaborado de forma mais direta, conectando uma sequência alternada de pontos ao longo da curvatura.

Figura 40 – Processo de conformação da sintaxe da membrana



(fonte: SUZUKI *et al.*, 2020)

Com a definição, tanto da forma da viga de borda quanto do seu padrão de preenchimento, foi executada mais uma etapa de *form-finding* da estrutura através do *ElasticSpace*, desta vez, se levando em conta a sua configuração global: foi considerada a interação entre viga de borda e tramas de preenchimento. Assim, a forma geral da estrutura foi novamente submetida a análises de flexão levando em consideração a influência da deformação dos padrões de preenchimento (figura 57). Neste processo, foram desconsiderados os efeitos de torção nas ripas para simplificar o processo de design (SUZUKI *et al.* 2020). Por fim, após encontrar a forma global da estrutura, a última etapa foi desenvolver um modelo digital para orientar a montagem da estrutura. Assim, foi possível etiquetar digitalmente cada elemento da estrutura, bem como a posição das futuras conexões (figura 58), simplificando a sequência de montagem (SUZUKI *et al.* 2020).

Figura 41 – Modelo digital final da instalação

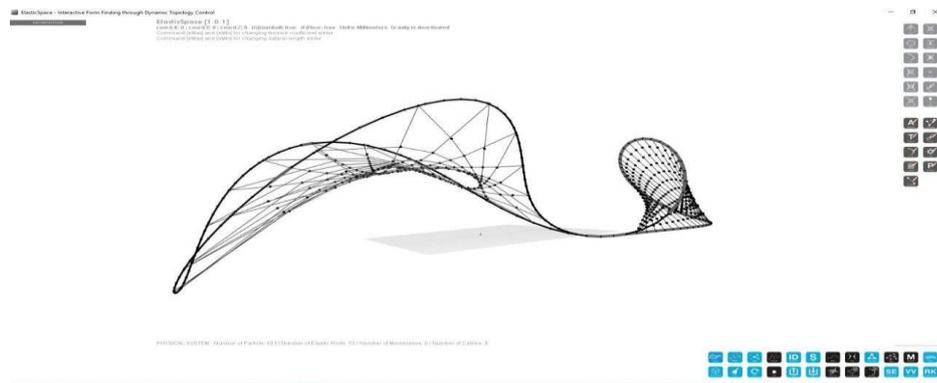
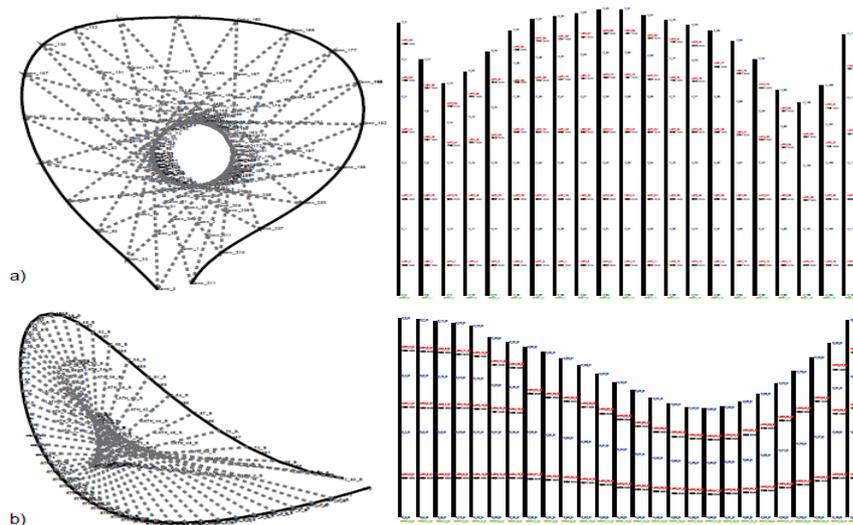
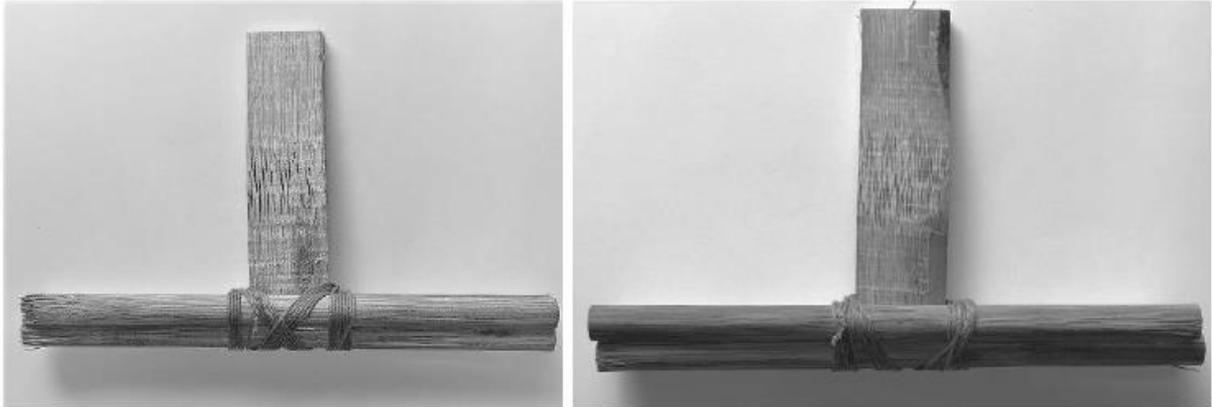
(fonte: SUZUKI *et al.*, 2020)

Figura 58 – Etiquetação digital das hastes que compõe a trama da instalação

(fonte: SUZUKI *et al.*, 2020)

A montagem foi realizada *in loco* com auxílio de um andaime e escoras de bambu para sua estabilização. Iniciou pela montagem da viga de borda, a partir da conexão dos seus segmentos mais curtos, cada qual composto de três hastes alternadas amarradas juntas, como uma viga única, para obter a rigidez necessária para sustentar a estrutura e evitar que duas conexões ficassem no mesmo lugar, causando um ponto fraco de torção (SUZUKI et al. 2020). As hastes foram amarradas tanto entre si quanto junto às ripas, utilizando um sistema de nós de alta tensão em cordão de juta natural (figura 59), tradicionalmente utilizado em construções de bambu (SUZUKI et al. 2020).

Figura 59 – Amarração das conexões, utilizando cordão de juta natural



(fonte: SUZUKI *et al.*, 2020)

O processo de montagem da malha começou em paralelo com a montagem da viga de borda. Partiu da medição de todas as ripas de bambu, quando foi constatado que nem todo o material foi produzido com o comprimento esperado de 3 metros, exigindo a reclassificação das ripas com base em um comprimento mínimo comum, que, por sua vez, necessitou de uma atualização do modelo digital a partir de nova lógica de montagem, utilizando de forma eficiente o material excedente disponível para produzir elementos mais longos (SUZUKI *et al.* 2020). Assim que a questão foi resolvida, as ripas de bambu foram, enfim, fixadas, restringindo movimentos laterais e rotações. Finalmente, as ripa mais longas foram inseridos emulando os procedimentos de produção da cestaria artesanal (figura 60), sendo posicionados e fixados em marcadores da viga lateral e guiados na direção de flexão e torção desejada.

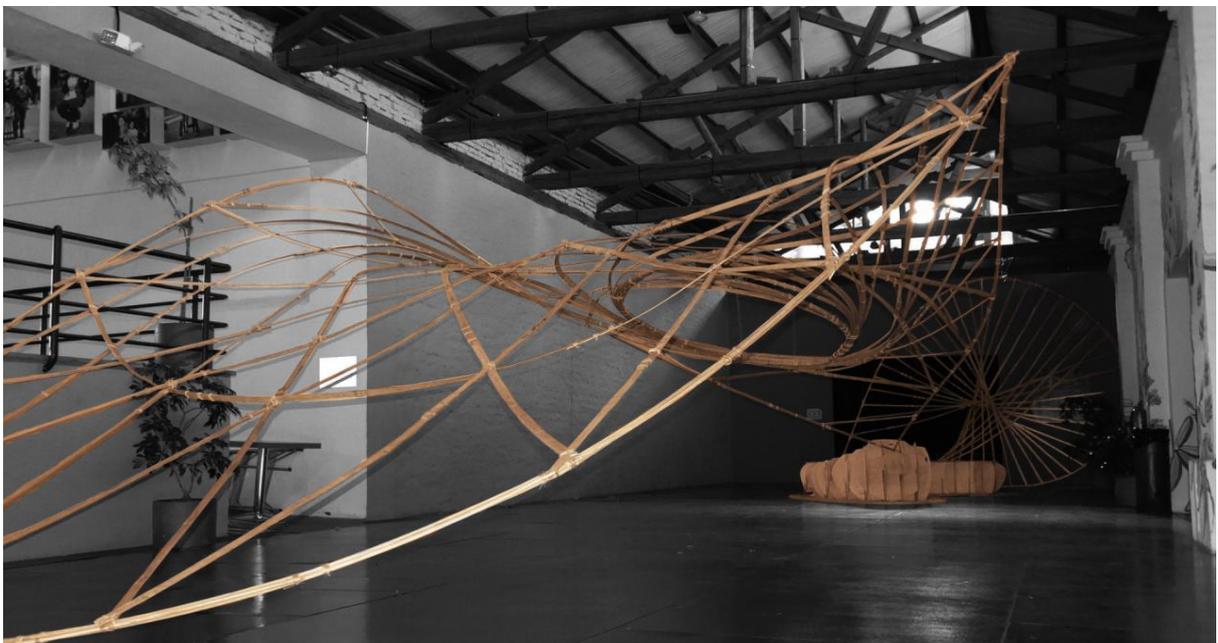
Figura 420 – Lógica de inserção e conexão das ripas



(fonte: SUZUKI *et al.*, 2020)

Após a fixação das conexões entre as ripas, as escoras de bambu foram progressivamente removidas e a estrutura fixada junto ao assento, garantindo estabilidade à mesma. A estrutura concluída foi construída com ripas de bambu natural de 5 milímetros de espessura e hastes de 10 milímetros de diâmetro, estendendo-se por 7,5 metros no espaço, com 15,5 metros de comprimento e uma altura de 4 metros em seu pico (figura 61). Após o período expositivo de seis meses, foi desmontada e todos os seus componentes reciclados ou reaproveitados (SUZUKI et al. 2020).

Figura 61 – Instalação finalizada



(fonte: SUZUKI et al., 2020)

4.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO 4

Para tornar clara a sua aplicação, foram apresentados três estudos de caso, em que se buscou representar processos de design digital elencados a cada tipo de *form-finding* digital existente como representação da amplitude do potencial desta exploração. Foram eles o “*Reverse Rafter*”, representando o *form-finding* baseado em estrutura; o “*Gridshell*”, representando o *form-finding* baseado em forma; e o “*Computational Bamboo*”, representando o *form-finding* baseado em material. A seguir, será apresentada a discussão dos resultados a respeito da análise destes fatores, bem como da sua possível síntese, e sua relação com os objetivos da pesquisa.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao longo do quarto capítulo desta dissertação, foram apontados tanto os fatores que exprimem o senso de pertencimento de uma localidade, configurando a expressão sociocultural de uma região, como os fatores que induzem e influenciam os processos formativos na tectônica digital, de maneira a materializar e expressar, a partir das tecnologias digitais, novas tectônicas.

Como resultado, foi apontado que, mais contemporaneamente, a dimensão simbólica da tectônica, que expressa o senso de lugar, parte, sobretudo, de uma percepção sensível das suas características utilizando os sentidos humanos em uma interpretação mais holística, privilegiando a tatilidade em detrimento dos aspectos cenográficos e visuais. A partir dessa interpretação tátil, elementos associados aos recursos ambientais e sociais de uma localidade são explorados como elementos significativos constituintes do seu senso de pertencimento ou familiaridade. Assim, as características dos materiais naturais abundantes em uma região, ou tradicionalmente utilizados na construção de edificações, são associados ao seu uso em determinada cultura. Desta mesma forma, as técnicas empregadas no artesanato e na construção local também carregam essa carga semântica a respeito da identidade das comunidades.

Estes e outros fatores que possam ser associados à experiência humana em determinado local, em uma perspectiva histórica e cultural, podem ser explorados dentro do processo de materialização da tectônica – associadas às questões construtivas, estruturais ou materiais – conformando sua dimensão representativa da identidade local. Considerando-se isto, também foi possível reconhecer, na tectônica, o potencial de exprimir diferentes condições do “saber fazer” de estados societários, a partir da relação entre suas dimensões ontológicas e epistêmicas. Ou seja, associando o seu desenvolvimento técnico e tecnológico às condições ontológicas nas quais se insere.

O surgimento das tecnologias digitais, e sua conseqüente quebra de paradigmas na lógica produtiva da era industrial, também diz respeito a essas alterações “ontológica-etimológica” da tectônica, originando uma “tectônica digital”, intimamente relacionada aos modos de produção, do design e da fabricação digitais, representando um “saber-

fazer” da Era Digital. Este saber-fazer particular desta nova era, por sua vez, é baseado nos processos de formação, em *form-finding*, originários da morfogênese digital, o qual emula os processos biológicos de formação, em meio digital. Desta maneira, é através desses processos – que envolvem as capacidades computacionais de geração, análise e otimização da forma – que os processos de materialização da tectônica são reproduzidos em meio digital, formando estruturas topológicas complexas por meio de estratégias de design e fabricação digitais.

Identificados os fatores associados à identidade local na tectônica, em sua forma tradicional, e os fatores formativos em sua forma digital, partiu-se para a compreensão de como esses fatores poderiam ser associados, visando a geração de elementos tectônicos sob a égide da relação epistemológica e ontológica da era digital, preservando as dimensões simbólicas das comunidades locais, em termos de identidade regional. A relevância, em compreender como estes podem se relacionar, está em contrapor uma perspectiva de aplicação e teorização da aplicação das ferramentas digitais na produção do ambiente construído calcada apenas em termos de performance ambiental e social, ou seja, baseando a expressão tectônica puramente em questões técnicas e as desconectando de sua perspectiva cultural.

Neste contexto, é ressaltado o trabalho de Philip Yuan, que propõe uma adaptação das teorias vigentes em relação a produção tectônica digital aos aspectos culturais regionais. Esta, por sua vez, seria promovida pela inserção de parâmetros relacionados aos materiais e técnicas construtivas locais no processo de formação dos modelos tectônicos digitais. Deste modo, as características dos costumes e do patrimônio cultural local seriam traduzidas em informações digitais, guiando o processo de design (YUAN, 2015). A decisão sobre quais aspectos serão transfigurados em parâmetros para informar o projeto, bem como a maneira com que serão tratados, na abordagem de design digital, ficaria em cargo do projetista: livre para explorar os diferentes métodos. A partir disso, buscou-se demonstrar exemplos de elementos tectônicos formulados a partir de uma abordagem de design que combina o *form-finding* digital com fatores expressivos da cultura local. Estes foram organizados a partir dos diferentes tipos de *form-finding* – baseado em estrutura, forma ou material.

O primeiro estudo de caso, “*Reverse Rafter*”, tratou de uma instalação artística que explorou o *form-finding* digital baseado em estrutura. O exemplo teve por inspiração a lógica estrutural dos telhados de madeira de construções vernaculares chinesas do período da dinastia Qing, combinando uma abordagem de design digital baseado em desempenho com fabricação digital. No seu processo de formação, foi analisado o comportamento estrutural destes elementos arquitetônicos, a partir do cálculo tradicional das forças atuantes na estrutura, que, por sua vez, demonstram a sofisticação de seu perfeito equilíbrio estático, cujo “*know-how*” é transmitido através das gerações por um tratado construtivo.

Em seguida, foram realizadas explorações dimensionais nos beirais dos telhados, buscando compreender os efeitos dessas alterações em seu comportamento estrutural, deduzindo novas lógicas de aplicações das cargas que resultam em configurações alternativas. Estas, por sua vez, expandiram as possibilidades sintáticas presentes no tratado construtivo, sustentando, ainda assim, o seu equilíbrio estático. Por fim, as informações referentes ao comportamento estrutural dos beirais alimentaram a geração de um novo padrão estrutural, originando o caráter original da forma final da instalação, que ainda foi submetida a etapas de otimização dos componentes estruturais e racionalização da sua fabricação e montagem.

De acordo com os autores, nesta abordagem a cultura é utilizada como contexto para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras, enquanto o design baseado em desempenho estrutural proporciona a solução científica para tal (YUAN; CHAI, 2014). Dessa forma, uma nova expressão tectônica emerge a partir de uma releitura dos princípios estruturais dos antigos beirais chineses, propiciada pelo potencial de ferramentas digitais de análise, geração e otimização, a partir de um estudo exploratório da relação entre técnica e estrutura aliada à expressão artística. Logo, este estudo demonstra a possibilidade de utilizar o *form-finding*, baseado em estrutura, para tirar partido de elementos estruturais próprios da tectônica de exemplares vernaculares e os interpretar à luz dos processos digitais. Esta possibilidade gera uma solução inédita, a partir dos preceitos que configuram a tectônica digital, representando a integração entre tecnologia e cultura local.

O segundo estudo de caso, “*Gridshell*”, diz respeito a um pavilhão para demonstrar o potencial da exploração de novas configurações formais, a partir de releituras de

“*gridshells*” – sistema construtivo em madeira amplamente empregado por diversas culturas – a partir das tecnologias digitais. Para isso, optaram por um processo em *form-finding* baseado na forma, em que os resultados partem da constante negociação entre a expressão artística e os requisitos funcionais e de fabricação na sua viabilização a partir de uma forma predeterminada. Assim, após a modelagem da “forma alvo” do projeto, nesse caso uma superfície de *Enneper*, foi formulado um método para sua materialização, baseado na mesma lógica construtiva das *gridshells*: hastes e tiras flexionadas de material de origem vegetal que conformam a estrutura e o fechamento de edificações.

Para tal, aplicaram-se técnicas de geração para conformar as linhas guias do material a preencher a superfície pré-estabelecida, dando origem à configuração de sua malha estrutural. Em seguida, o padrão estrutural foi submetido a um processo de otimização visando a diminuição de sua curvatura, garantindo maior integridade estrutural, tendo em vista as características do seu material. Por fim, para tornar possível a sua fabricação, foi necessário criar um método de fabricação digital que partiu da fabricação robótica por meio de um braço robótico adaptado com uma serra fita. Assim, foi possível produzir os perfis complexos resultantes da etapa de geração e otimização. A montagem também precisou ser racionalizada com auxílio de ferramentas digitais, realizando a etiquetagem de todas as peças e fornecendo um modelo digital para orientar seus posicionamentos na obra, bem como a sua ordem de montagem.

A utilização do *form-finding* baseado em forma, nesse projeto, mostrou-se uma abordagem eficiente e capaz de orientar o processo de design baseado em sistemas construtivos vernaculares característicos de determinadas culturas. Muito embora não tenha se explorado características particulares que diferenciam as *gridshells* produzidas por diferentes culturais, ainda assim o projeto foi adequado ao demonstrar um procedimento ao qual qualquer configuração de *gridshell*, com suas particularidades, pode ser reinterpretada à luz das tecnologias digitais. Ao associar o potencial digital à lógica dos sistemas construtivos tradicionais, foi possível expandir suas possibilidades de sua configuração tectônica, preservando o caráter artesanal desse método construtivo em associação com a possibilidade de novas constituições topológicas, próprias da episteme digital. Foi uma instalação em grande escala, demonstrando o potencial das propriedades elásticas do bambu, a partir em

associação ao potencial computacional. A estrutura difere de outras estruturas de bambu, em flexão ativa, por adotar a liberdade projetual, presente na técnica artesanal da cestaria tradicional, e introduzir estratégias de *form-finding* baseado em material.

O terceiro estudo de caso, “*Computational Bamboo*”, tratou de uma instalação temporária que investigou o potencial da combinação de técnicas avançadas de computação e materiais naturais locais, na formação de estruturas em flexão ativa, a partir de um processo de *form-finding* baseado em material. O material escolhido para a instalação foi o bambu, amplamente empregado em construções vernaculares de diversas culturas, reconhecido por suas excelentes propriedades em relação à flexão. Assim, o conceito do “*Computational Bamboo*” foi elaborado a partir da ideia de reinterpretar, computacionalmente, os princípios de design vernacular com bambu, utilizando a deformação elástica do material como estratégia (SUZUKI et al. 2020).

Para isso, optaram por utilizar um método interativo de formação com auxílio do software “*ElasticSpace*”, que permitiu a modelagem digital dos limites da estrutura (vigas de borda), em *form-finding* material, emulando as propriedades do bambu sob a ação de flexão. Isto permitiu adequar a estrutura aos requisitos funcionais do projeto. Para esta etapa, foram necessários testes empíricos de flexão do bambu, adequando o processo de design em relação às propriedades específicas do bambu disponível, minimizando falhas estruturais. Em seguida, em uma abordagem de *form-making*, foi desenvolvido um algoritmo específico para o preenchimento da estrutura, em lógica semelhante à produção da cestaria.

A estrutura da instalação ainda foi submetida a uma etapa de otimização topológica, determinando a espessura dos perfis a serem produzidos. O tratamento do bambu, para confecção da estrutura, não contou com uma etapa de fabricação digital, sendo produzido por equipamentos industriais tradicionais. Entretanto, para sua montagem, foram empregadas ferramentas digitais, a fim de racionalizar e simplificar os processos de montagem. Como resultado, foi gerada uma estrutura de configuração inédita, a qual tem sua complexidade geométrica e topológica resolvida, por processamento computacional, com base em restrições do bambu, proporcionando a exploração de novas relações tectônicas para materiais usualmente empregados nas construções vernaculares locais. Desta forma, demonstrando que aspectos construtivos próprios de cada cultura possam ser explorados durante esse processo.

Para resumir as informações referentes aos estudos de caso, foi elaborada o quadro 1, contendo as abordagens de design respectivas a cada caso, seguidas dos parâmetros socioculturais que orientaram esses processos. Detalha-se, também, as ferramentas digitais que foram aplicadas em cada etapa de design.

Quadro 1 – Descrição das abordagens, parâmetros e técnicas aplicadas nos estudos de caso

Projeto	Form-finding	Parâmetro sociocultural	Ferramentas digitais: Geração	Ferramentas digitais: Análise	Ferramentas digitais: Otimização	Ferramentas digitais: Fabricação
Reverse Rafter	Baseado em estrutura	Princípio estrutural dos telhados da tipologia vernacular chinesa da dinastia Qing	Grasshopper*	Millipede	Millipede	Fresadora CNC
Gridshell	Baseado em forma	Técnica construtiva baseada no gridshell proveniente de construções vernaculares (em geral)	Grasshopper + Millipede	Karamba	Kangaroo	Fresadora CNC + Corte de serra com braço robótico
Computational Bamboo	Baseado em material	Propriedades de flexão do bambu	ElasticSpace + Grasshopper	ElasticSpace	ElasticSpace	Não há

(fonte: elaborado pelo autor)

O primeiro ponto a ser destacado são as relações entre os tipos de *form-finding* e os parâmetros socioculturais aplicados. No caso do estudo baseado em estrutura, o parâmetro aplicado foi o princípio estrutural de um elemento arquetônico, de maneira que este princípio estrutural orientou o processo de descoberta da forma. No *form-finding* baseado em forma, foi utilizada a configuração de um sistema construtivo vernacular, que pode ser traduzido como “técnica construtiva”, de maneira que as suas características compositivas orientam o processo de descoberta da forma. Por fim, quando baseado em material, valeu-se das características de um material atípico na indústria da construção e amplamente utilizado em construções vernaculares, de maneira que uma de suas propriedades orientou o processo de descoberta da forma.

Outro destaque para o qual deve ser dada atenção é a respeito da pluralidade de ferramentas digitais aplicadas, sendo que cada caso se valeu de uma configuração destas, ainda que todas compartilhem o emprego do *Grasshopper* como editor de algoritmos que permitiu a condução do processo de projeto. Destaca-se também a aplicação do *Millipede* na abordagem baseada em estrutura, tendo em vista que este é especializado em análise por elementos finitos. Entretanto, outros complementos do

Grasshopper, como o “*Karamba*”, propício para análise de treliças espaciais e membranas, e o “*Kangaroo*”, um motor de física que realiza simulações, otimizações e processos de *form-finding*, também puderam ser utilizados, cada qual com seu conjunto de ferramentas. O *ElasticSpace*, nesse contexto, é uma aplicação a parte, pois foi desenvolvido para o *form-finding* de estruturas em flexão, especialmente estruturas têxteis.

Por fim, a respeito das ferramentas de fabricação digital, destaca-se a aplicação de um braço robótico modificado, com uma serra fita acoplada ao mesmo, que destoa das soluções dos demais estudos de caso pela sua sofisticação. O motivo dos demais casos não adotarem soluções mais rebuscadas não é claro, mas pode-se especular que seja pela falta de acesso a estas ferramentas, de maneira que os equipamentos mais disponíveis são aqueles que normalmente figuram em laboratórios de fabricação digital e espaços *makers*, como fresadoras, impressoras 3D e cortadoras a laser. Todavia, tratando-se da exploração de soluções inovadoras, é preferível uma maior customização e adaptação dessas ferramentas. Deve-se ressaltar de que estas modificações estejam orientadas pela solução de design em questão, do qual estudos desta natureza parecem ter muito a se beneficiar de uma aproximação dos campos do Design, Arquitetura e Engenharia com a robótica.

6 CONCLUSÃO

A dissertação buscou compreender as possibilidades de conciliação entre os aspectos tectônicos e digitais nos processos de formativos da tectônica digital para melhor adaptá-los ao contexto sociocultural, estes não apenas interpretados como forças ambientais e sociais, mas também dotados de significados culturais. Para tal, optou-se por investigar a teoria da tectônica, buscando discernir tanto os fatores com potencial simbólico, assim como as alterações ontológicas no processo da materialização da tectônica na sua versão digital. Assim, buscou-se compreender como a produção do ambiente construído na Era Digital, a partir do design e da fabricação digitais, poderia ser concebida considerando-se a relação entre ambos os fatores, associando identidade local ao processo de formação digital.

Como resultado, identificou-se que a dimensão simbólica da tectônica tradicional, que expressa o senso de lugar, parte de elementos associados aos recursos ambientais e sociais. Estes configuram a cultura de uma localidade, como por exemplo: as características dos materiais e as técnicas empregadas no artesanato e na construção e a configuração tipológica das construções. Desta maneira, é possível transpor estas características para orientar processos projetuais tectônicos, como parâmetros de carga semântica a respeito da identidade da comunidade.

Por outro lado, identificou-se, também, nos processos de formação, em *form-finding* digital, da morfogênese digital, as capacidades computacionais de geração, análise e otimização da forma que emulam os processos de materialização da tectônica tradicional em meio digital. Isto dá origem à tectônica digital e permite a formação de estruturas de configurações topológicas e complexas por meio de estratégias de design e fabricação digitais.

ser associados. Está associação visou a geração de elementos tectônicos sob a égide da relação epistemológica e ontológica da Era Digital preservando as dimensões simbólicas das comunidades locais, em termos de identidade regional.

Descobriu-se, baseado nos trabalhos de Philip Yuan, que é possível agregar, ao processo de formação da tectônica digital, parâmetros relacionados à expressão do

lugar da tectônica tradicional. Estes parâmetros são relativos a materiais, técnicas construtivas e configurações tipológicas que caracterizam a produção local. Assim, características dos costumes e do patrimônio cultural local possam ser traduzidas em informações digitais, guiando o processo de design (YUAN, 2015).

A partir disto, buscou-se demonstrar exemplos de elementos tectônicos formulados a partir de uma abordagem de design que combina o *form-finding* digital com fatores expressivos da cultura local. Estes foram organizados a partir dos diferentes tipos de *form-finding* – baseado em estrutura, forma ou material, visando complementar os achados a respeito da estreita relação entre o conteúdo teórico da morfogênese digital e o desenvolvimento teórico da tectônica em sua forma digital.

Por fim, a partir da descrição dos estudos de caso, é constatada a possibilidade de produção de relações tectônicas que conciliam aspectos relacionados à identidade cultural com os modos de produção digitais. Isto possibilita que critérios culturais sejam considerados da mesma forma que parâmetros de performance ambientais e sociais no processo de produção do ambiente construído na era digital.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o advento da Era Digital levando as tecnologias do design e da fabricação digitais, tornou-se possível a produção de elementos e sistemas construtivos personalizados, com alta complexidade formal e performance de desempenho, conduzindo à economia e, até, à sustentabilidade. Entretanto, é imperativo que estas novas tecnologias digitais não sejam utilizadas apenas sob a lógica da instrumentalidade – como ferramentas alienantes, mas sim como portadoras de um novo potencial crítico a respeito do paradigma tecnológico pós-industrial.

Portanto, passa a ser necessário sobrepujar a lógica otimizadora, que instaurou as ferramentas digitais – preocupadas com a maximização de valores de desempenho e de viabilidade econômica, ignorando as dimensões simbólicas do construir – por uma abordagem aberta, crítica e socialmente consciente a respeito do emprego da capacidade produtiva dos meios digitais e sua relação com a dimensão humana, respeitando todo o seu espectro e especificidades.

A presente dissertação, a partir dessa constatação, explorou as novas expressões tectônicas, que emergem dos novos meios de produção digital, nas quais aspectos expressivos, simbólicos, funcionais e tecnológicos se entrelaçam, criando novos significados. A tectônica corresponde a uma dimensão formal poética, preocupada, portanto, com a revelação do espírito humano, por meio da maneira específica com a qual uma obra passa a ser desenvolvida. Portanto, transcende a instrumentalidade como um fim em si mesma.

A elucidação de como o potencial digital pode ser associado a novas expressões tectônicas, estas preservando sua dimensão cultural associada às diferentes identidades regionais, vai de encontro com a interpretação de um dispositivo tecnológico como uma escolha cultural. Este posicionamento do intelecto crítico, contrário ao processo simplório de reduzir o potencial digital à otimização, é um elemento importante para maiores debates a respeito das tecnologias digitais, incluindo, especialmente, sua dimensão simbólica. Logo, são necessários estudos tanto a respeito de uma agenda semiológica para o design e fabricação digitais, explorando não apenas o como essas tecnologias podem desenvolver inovações em termos estruturais, mas também em como irão impactar positivamente o espírito

humano e seu ambiente, em termos ecológicos, no senso mais amplo de ecologia – envolvendo as questões sociais.

Além disso, estudos a respeito de abordagens do design tectônico digital, especialmente os comprometidos com formulação de sistemas construtivos inspirados na reinterpretação de características vernaculares da cultura vigente se mostraram promissores, e, portanto, fazem-se necessários maiores aprofundamentos. Muito embora o presente trabalho apresente a natureza dos fatores envolvidos, não se atém a questões lógicas e técnicas que conduzem o processo projetual. Logo, percebe-se a oportunidade de maior detalhamento, em termos de diretrizes e métodos.

Oportunidades também foram identificadas no campo da fabricação digital, no qual a customização das suas apresentaram potencial para novos estudos relativos à síntese de características tectônicas e digitais em novas soluções construtivas. Neste tópico destaca-se as possíveis contribuições da fabricação robótica.

Por fim, faz-se a ressalva de que o Brasil, uma nação caracterizada pela pluralidade cultural e dotada de abundante diversidade ecológica, tem uma imensa oportunidade de se apropriar culturalmente das tecnologias digitais, bem como do progresso que proporcionam. Pode-se, portanto, reeditar a identificação gerada a partir da absorção dos valores modernos, quando da aplicação do concreto, por exemplo, ao longo do seu projeto de desenvolvimento nacional, especialmente na década de 1950.

RECONHECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ADRIAENSSENS, Sigrid; RHODE-BARBARIGOS, Landolf; KILIAN, Axel; BAVEREL, Olivier; CHARPENTIER, Victor; HORNER, Matthew; BUZATU, Denisa. Dialectic Form Finding of Passive and Adaptive Shading Enclosures. **Energies**. v. 7, p. 5201-5220, 2014.

AMARAL, Izabel. Quase tudo que você queria saber sobre tectônica, mas tinha vergonha de perguntar. **Pós**. Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP. V. 16, n. 26, p.148-167, São Paulo, 2009.

BALINSKI, Grzegorz; JANUSZKIEWICZ, Krystyna. Digital Tectonic Design as a New Approach to Architectural Design Methodology. **Procedia Engineering**. v.161, p. 1504-1508, 2016.

BEESELEY, Philip; SEEBOHM, Thomas. Digital Tectonic Design. **Promise and Reality: State of the Art versus State of Practice in Computing for the Design and Planning Process**. Weimar, 2000, p. 287-290.

BEESELEY, Philip. **Sibyl: Projects 2010-2012**. Toronto: Riverside Architectural Press, 2012.

BERGDOLL, Barry. **European Architecture 1750-1890**. Oxford: Oxford University Press, 2000.

CANEPARO, Luca; CERRATO, A; WINKLESS, C. **Digital Fabrication in Architecture, Engineering and Construction**. Cham, Springer. 2014.

CANTALICE, Aristóteles. **Descomplicando a tectônica: três arquitetos e uma abordagem**. 2015. 304 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Urbano), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

COLLINS, Peter. **Concrete: the vision of a new architecture**. London: McGillian books, 1959 [2004].

CORDEIRO, Alexander Magno et al. **Revisão sistemática: uma revisão narrativa**. Rev. Col. Bras. Cir., Rio de Janeiro, v. 34, n. 6, p. 428-431, Dec. 2007.

DE MATTIA, Daniella. The birth of the Tectonics: from the history of construction to the structural analysis and architectural design. **Structural Analysis of Historical Constructions**. Wroclaw, 2012, vol. 2, p. 1097-1105.

DELL'ERA, Claudio; VERGANTI, Roberto. **Strategies of Innovation and Imitation of Product Languages**. Journal of Product Innovation Management. v.24, p.580-599. 2007.

DELL'ERA, Claudio; VERGANTI, Roberto. **Design-Driven Innovation: meaning as a source of innovation**. 2014.

EISENHARDT, K. M. **Building Theories from Case-Study Research**. Academy of Management Review, v.14, n.4, Out, p.532-550, 1989.

- FRAMPTON, Kenneth. Prefácio à quarta edição. In: FRAMPTON, Kenneth. **História crítica da arquitetura moderna**. 4. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2015 [1982]. p. VII-VIII.
- FRAMPTON, Kenneth. *Studies in tectonic culture: The poetics of construction in nineteenth and twentieth century architecture*. John Cava (E.). Cambridge: MIT Press, 1995, 430. p. il.
- FRAMPTON, Kenneth. Towards a critical regionalism: six points for an architecture of resistance. In: Foster, H. (ed). **Postmodern culture**. London: Pluto Press, p. 16-30, 1983.
- GAO, Wan-Ping. Tectonics? A case study for digital free-form architecture. **Proceedings of CAADRIA 2004**, Yonsei University Press, Seoul, p.519–534, 2004.
- GASS, Siegfried. Physical analog models in architectural design. **International Journal of Space Structures, [S.I.]**, v. 31, 2016. Disponível em: 10.1177/0266351116642061. Acesso em: 10 jan. 2020.
- GUTSCHOW, Kai. Restructuring Architecture's History: Historicism in Karl Bötticher's Theory of Tectonics. **(Re)Viewing the Tectonic Collegiate Schools of Architecture Regional Conference**, Ann Arbor, 2000.
- HARGADON, Andrew; SUTOON, Robert. **Technology Brokering and Innovation in a Product Design Firm**. *Administrative Science Quarterly*. v.42, p.716-749, 1997.
- HENSEL, Michael; MENGES, Achim; WEINSTOCK, Michael. *Emergence: Morphogenetic Design Strategies*, **Architectural Design**, London: Wiley Academy, 2004.
- HVATTUM, Mari. **Gottfried Semper and the Problem of Historicism**. Cambridge University Press, Cambridge, 2004
- JIANG, Yan; MAO, Lingtao; CAO, Xiaoli: The structural analysis of overhanging length of ancient building eave-rafter. **17th Beijing Society Of Theoretical And Applied Mechanics Congress Proceedings**. Beijing: CSTAM, p. 572-573, 2011.
- KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. London: Spon Press, 2003b.
- KOLAREVIC, Branko. Computing the performative in architecture. In: DOKONAL, W. (ed). **Digital design**. Graz, Austria: ECAADE, 2003a.
- KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. [S.I.]: Taylor & Francis, 2005.
- KOTNIK, Toni. Digital architectural design as exploration of computable functions. **International Journal of Architectural Computing**, v. 8, n. 1, p. 1-16, 2010.
- LAUGIER, Marc-Antoine. **Ensayo sobre la arquitectura**. Madrid: Ediciones Akal, 1753 [1999].

LIANG, Sicheng. **Qingshi Yingzao Zeli**. China Architecture & Building Press.1981.

LIU, Yu-Tung, LIM, Chor-Kheng. New tectonics: A preliminary framework involving classic and digital thinking. **Design Studies**, v.27, p.267-307, 2006.

LEACH, Neil; TURNBULL, David, WILLIAMS, Chris (E.). Digital tectonics. Chichester: West Sussex, U.K.; Hoboken, NJ: Wiley-Academy, 2004, 152p.

LEACH, Neil. Digital Morphogenesis. **Architectural Design**. n.79. p.32-37, 2009.

LENZ, Daniel; CELANI, Gabriela. Performative architecture: uma arqueologia tecnológica. **Arquitextos**, São Paulo, v. 16, n. 186.04, nov. 2015. Disponível em: <https://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/16.186/5844>. Acesso em: 09 jan. 2020.

LIENHARD Julian. Bending-active structures: form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein. Tese de doutorado. Universität Stuttgart, Estugarda, 2014.

LIENHARD et al. Active Bending: a Review on Structures where Bending is Used as a Self-Formation Process. **International Journal of Space Structures**, v.28, p.187–196, 2013.

LIU, Yu-Tung; LIM, Chor-Keng. New tectonics: a preliminary framework involving classic and digital thinking. **Design studies**, n.27, p.267–307, 2006.

LLOYD, Peter; SNELDERS, Dirk. What Was Philippe Starck Thinking of?. **Design Studies**, v.24, 2010.

MADEIRA, Luís Emanuel Lopes da Silva. **Gottfried Semper**: proposta para um método (1852-1859). 2015. Dissertação (Mestrado Integrado em Arquitectura) - Departamento de Arquitectura, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2015.

MENGES, Achim. Computational Morphogenesis: Integral Form Generation and Materialization Processes. **Embodying Virtual Architecture: The Third International Conference of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design (ASCAAD 2007)**. Alexandria, Egypt., pp. 725-744, 2007.

MICHALATOS, Panagiotis. **Gradients of compliance—reintroducing structural considerations into the design process**. Time+Architecture. v.14(5) p.26-33, 2014

MILES et al. **Qualitative Data Analysis: A Methods Sourcebook**. California: SAGE, 2013.

MINKE, Gernot. **Building with bamboo**. Birkhäuser, Basel, 2012.

MITCHELL, W. **The logic of architecture**: design computation and cognition. Cambridge: MIT Press, 1990.

MITCHELL, William. Constructing complexity. Proceedings of the Tenth International Conference on Computer Aided Architectural. **Design Futures**, Vienna, p. 41-50. 2005.

MITCHELL, William; MCCULLOUGH, Malcolm. **Digital design media**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1995.

OXMAN, Rivka. Theory and design in the first digital age. **Design Studies**, [S.l.], v. 27, special issue, p. 229–265, 2006.

OXMAN, Rivka. Digital architecture as a challenge for design pedagogy: theory, knowledge, models and medium. **Design Studies**, [S.l.], v. 29, n. 2, p. 99-120, 2008.

OXMAN, Rivka. Digital tectonics as a morphogenesis process, a special issue on morphogenesis. **IASS: Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures**, v.51, p.195-207, 2009.

OXMAN, Rivka. Morphogenesis in the theory and methodology of digital tectonics. **IASS - Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures**, v.51, p.195-205, 2010.

OXMAN, Rivka. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. **Design Studies**, v.52, p. 4 -19, 2017.

OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert. New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. **Architectural Design**. v.80, p.14 - 23, 2010

OLIVER, Paul. **Encyclopedia of vernacular architecture of the world**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

PALLASMAA, Juhani. **The Eyes of the Skin. Architecture and the Senses**. New York: John Wiley, 2005 [1996].

PONE et al. Timber post formed grid shell: digital form finding/drawing and building tool. **IASS – Journal of the International Association for Shell and Spatial**. 2013.

RAPOPORT, A. **House form and culture**. New Jersey: Prentice Hall, 1969.

ROTHER, Edna Terezinha. Revisão sistemática X revisão narrativa. **Acta paul. enferm.**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. v-vi, Jun, 2007. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-21002007000200001&lng=en&nrm=iso>. Acessado em 08 de fevereiro de 2021.

SANTOS, Diogo Gomes Ferreira. **O paradigma da arquitetura digital: da padronização à customização em massa**. 2016. 114 f., il. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) —Universidade de Brasília, Brasília, 2016

SCHUMACHER, Patrik. Smart Work – Patrik Schumacher on the Growing Importance of Parametrics. **RIBA Journal**, 2008.

SCHUMACHER, Patrik. **The Autopoiesis of Architecture: a new framework for Architecture**. Chichester: Wiley, 2011.

SCHUMACHER, Patrik. **The Autopoiesis of Architecture, Volume II: a new agenda for Architecture**. Chichester: Wiley, 2012.

SCHUMACHER, Patrik. Tectonic Articulation: Making Engineering Logics Speak. **Architectural Design**, v.84, 2014.

SCHUMACHER, Patrik. Tectonism in Architecture, Design and Fashion: Innovations in Digital Fabrication as Stylistic Drivers. **Architectural Design**, v.87, p.106-113, 2017.

SCHWARTZ, Chad. **Introducing Architectural Tectonics**. New York: Routledge, 2017.

SCHWARZER, Mitchell. Ontology and Representation in Karl Botticher's Theory of Tectonics. **JSAH - Journal of the Society of Architectural Historians**, v.52, p. 267-80, 1993.

SEIXAS et al. Active Bending and Tensile Pantographic Bamboo Hybrid Amphitheater Structure. **IASS - Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures**. v. 58 2017.

SEKLER, Edward. Structure, construction, tectonics. **Structure in art and in science**. Nova York, George Braziller, p. 89-95, 1965.

SEMPER, Gottfried. The Four Elements of Architecture (1851). In MALLGRAVE; HERRMANN [org.]. **The Four Elements of Architecture and Other Writings**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

SHAKED, Tom. **The non-monumental monument: holocaust commemoration in the digital age**. 2016. Disponível em: 10.13140/RG.2.2.36204.67206. Acesso em: 10 jan. 2020.

SONGEL, Juan Maria. Sustainability lessons from vernacular architecture in Frei Otto's work: Tents and gridshells. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. p. 233-240. 2020.

SURVANT, Tyler; TALBOT, Mark. Projecting a Regionalist parametrics. **Project Journal**, v. 5, 2016.

SUZUKI, Seiichi; KNIPPERS, Jan. ElasticSpace: A computational framework for interactive form-finding of textile hybrid structures through evolving topology networks. **International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems**. v.32, p.1-11, 2017.

SUZUKI, Seiichi; SLABBINCK, Evy; KNIPPERS, Jan. **Computational Bamboo: Digital and Vernacular Design Principles for the Construction of a Temporary Bending-Active Structure**. 2020.

TEDESCHI, A. **AAD Algorithms-aided design: parametric strategies using grasshopper**. Napoli: Edizioni Le Pensur, 2014.

TIMBERLAKE, James. **Refabricating architecture**. New York: McGraw-Hill, 2003.

YIN, Robert. **Case study research: Design and methods (4th Ed.)**. California: SAGE, 2009.

YUAN, Philip; CHAI, Hua. **Reverse Rafter**: Structural performance simulation based on wood tectonics. CAADRIA 2015. p. 693-702, 2015.

YUAN, Philip; CHAI, Hua. **Reinterpretation of Traditional Wood Structures with Digital Design and Fabrication Technologies**: Innovative Techniques of Representation in Architectural Design. 2019.

YUAN, Philip; XIE, Yi; YAO, Jiawei; YAN, Chao. **Proceedings of the 2019 DigitalFUTURES**: The 1st International Conference on Computational Design and Robotic Fabrication (CDRF 2019). 2020.

WOODBURY, Robert. **Elements of parametric design**. [S.l.: s.n.], 2010.