



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Design Computacional e Fabricação Robótica

CLARICE ROHDE

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA

Design Computacional e Fabricação Robótica

CLARICE ROHDE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, Área de Concentração Patrimônio, Teoria e Crítica da Arquitetura, Linha de Pesquisa Teoria, História e Crítica.

ORIENTADORA: PROF.^a DR.^a LAÍS BRONSTEIN
COORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉS PASSARO

Rio de Janeiro
Março de 2018

DESIGN COMPUTACIONAL e FABRICAÇÃO ROBÓTICA

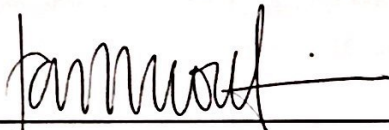
Clarice Rohde

ORIENTADORA: PROF.^a DR.^a LAÍS BRONSTEIN

COORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉS PASSARO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, Área de Concentração Patrimônio, Teoria e Crítica da Arquitetura, Linha de Pesquisa Teoria, História e Crítica.

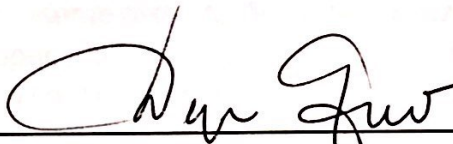
Aprovada por:



Presidente, Prof.^a Dr.^a Laís Bronstein



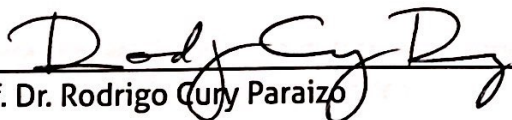
Prof. Dr. Andrés Passaro



Prof. Dr.^a Danusa Chini Gani



Prof. Dr. Gonçalo Castro Henriques



Prof. Dr. Rodrigo Cury Paraizo

Rio de Janeiro
Março de 2018

CIP - Catalogação da Publicação

R737d

Rohde, Clarice
Design Computacional e Fabricação Robótica /
Clarice Rohde. -- Rio de Janeiro, 2018.
181 f.

Orientador: Laís Bronstein.

Coorientador: Andrés Passaro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura,
2018.

1. Design Computacional. 2. Fabricação Robótica.
3. Fabricação Digital. 4. Arquitetura Digital. 5.
Sistemas Ciber-físicos. I. Bronstein, Laís, orient.
II. Passaro, Andrés, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ
com os dados fornecidos pela autora.

Citar como:

ROHDE, Clarice. *Design Computacional e Fabricação Robótica*. 2018. 181 f.
Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanis-
mo da UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.



Este trabalho é licenciado sob os termos Creative Commons de Atribuição,
Uso não comercial e Compartilhamento pela mesma licença (CC BY-NC-SA 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

DESIGN COMPUTACIONAL e FABRICAÇÃO ROBÓTICA

Clarice Rohde

ORIENTADORA: PROF.^a DR.^a LAÍS BRONSTEIN

COORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉS PASSARO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, Área de Concentração Patrimônio, Teoria e Crítica da Arquitetura, Linha de Pesquisa Teoria, História e Crítica.

Aprovada por:

Presidente, Prof.^a Dr.^a Laís Bronstein

Prof. Dr. Andrés Passaro

Prof. Dr.^a Danusa Chini Gani

Prof. Dr. Gonçalo Castro Henriques

Prof. Dr. Rodrigo Cury Paraizo

Rio de Janeiro
Março de 2018

Design Computacional e Fabricação Robótica

CLARICE ROHDE

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Laís Bronstein

Coorientador: Prof. Dr. Andrés Passaro

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura.

A fabricação robótica abre caminhos para uma nova materialização da arquitetura abarcando métodos construtivos adaptativos, interativos e responsivos de alta complexidade. As ferramentas de projeto e fabricação evoluem expandindo o design digital em direção ao design computacional, e para isso, uma nova maneira de pensar arquitetura precisa ser formulada. A presente dissertação pretende fazer um apanhado do desenvolvimento recente da computação aplicada à prática arquitetônica, com o objetivo de definir o estado da arte da produção robótica contemporânea da arquitetura através de novos processos de design computacional. A partir de exemplares de dois proeminentes laboratórios no assunto, o Gramazio Kohler Research e o ICD - Institute for Computational Design and Construction, pretendemos entender como essa produção se dá e quais as premissas que a orientam. Um contraponto é apresentado através de um exemplar desenvolvido no Hooke Park, abrindo caminho para uma abordagem local dessas tecnologias. O mesmo propomos aqui, o início de um debate nos trópicos sobre as possibilidades computacionais no campo da arquitetura, para em um futuro próximo nos apropriarmos com propriedade crítica das ferramentas de design e fabricação computacionais.

Palavras-chave: Design Computacional; Fabricação Robótica; Fabricação Digital; Arquitetura Digital; Sistemas ciber-físicos.

Rio de Janeiro
Março de 2018

ABSTRACT

Computacional Design and Robot Fabrication

CLARICE ROHDE

Advisors: Prof.^a Dr.^a Laís Bronstein

Prof. Dr. Andrés Passaro

Abstract of the Master Thesis submitted to the Post-graduation Program in Architecture at the Architecture and Urbanism Faculty, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Architecture at the Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ.

Robotic fabrication opens ways onto a new architecture materiality, encompassing highly complex adaptive, interactive and responsive constructive methods. Design and manufacturing tools evolve expanding digital design towards computational design, and for that, a new architectural thinking needs to be formulated. The present work intends to take a deep look at the recent development on computation applied to architectural practice, with the objective of defining the state of the art of contemporary robotic production of architecture through new computational design processes. From examples of two prominent laboratories in the subject, the Gramazio Kohler Research and the ICD - Institute of Design and Computational Construction, we intend to understand how this production occurs and what are their guiding premises. A counterpoint is presented through an example developed at Hooke Park, paving the way for a local approach to technologies. The same we propose here, the beginning of a debate in the tropics about the computational possibilities in the field of the architecture, in order to, in a near future, appropriate ourselves with a critical mindset about computational design and fabrication tools.

Keywords: Computacional Design; Robot Fabrication; Digital Fabrication; Digital Architecture; Cyber-physical Systems.

Rio de Janeiro
March 2018

Às mulheres da ciência e da natureza. À sua energia tão necessária em um mundo ainda tão em desequilíbrio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, aos meus pais Ricardo e Edy, meus irmãos Bruno, Ricardo e Isabela, pelo amor e pelo apoio incondicional à minha formação humana e acadêmica. Às minhas avós, que me deram a maior de todas as lições. Ao amor da enorme família Dias Rohde Dzwolak.

Aos meus orientadores, Prof.^a Laís Bronstein e Prof. Andrés Passaro pela confiança e todo aprendizado nesse árduo processo de compreender o mundo. Obrigada pelo exemplo de competência e ética, e por tornarem a FAU um lugar melhor.

À CAPES pelo auxílio financeiro, e aos brasileiros que tornaram esse trabalho possível.

À equipe do PROARQ pela ajuda e suporte na trajetória.

À equipe do LAMO, do passado, do presente e do futuro. Ao incansável Andrés que nos permitiu tudo isso. Ao Prof. Gonçalo Castro Henriques que hoje o coordena, e aos professores externos e internos que colaboram com essa história. Vocês são muito especiais, fazem acontecer coisas incríveis contrariando todas as ondas de má sorte da educação pública brasileira. Obrigada por todo apoio e colaboração, sempre.

À todos os professores que contribuíram de alguma maneira com minha formação e com a realização deste trabalho. Em especial à Beatriz Oliveira, meu maior exemplo de qualidade e rigor acadêmico, e à Marise Machado pelo incentivo sempre.

Aos amigos queridos de todos os cantos, que contribuíram energeticamente, intelectualmente, afetivamente e efetivamente, são tantos. Não ousou nomeá-los para não faltar com ninguém. Meu coração é imenso por vocês.

À família Ribeiro, vizinhos maravilhosos, que me alimentaram de afeto e de coisas da terra no momento de maior imersão. À Izabel e Gabriel, pelas visitas mesmo quando “eu não posso conversar”.

Dedico esse trabalho à todos os seres sencientes em absoluto, que seja benéfico.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO //1

1.1 Estrutura da dissertação //13

2. ARQUITETURA E TECNOLOGIAS DIGITAIS //15

2.1 Informatização e computação //16

2.2 Do digital ao computacional //26

2.3 Como computar? //46

3. FABRICAÇÃO ROBÓTICA DE ARQUITETURAS DIGITAIS //65

3.1 O robô //65

3.2 A produção robótica da arquitetura //69

3.3 A pesquisa avançada //75

3.4 Os estudos de caso //79

3.4.1 Gramazio Kohler Research - ETH Zürich //81

// Gantenbein Vineyard Facade, Fläsch, Suíça, 2006

// The Sequential Roof, Zürich, Suíça, 2016

3.4.2 Institute of Computational Design and Construction – University of Stuttgart //101

// Landesgartenschau Exhibition Hall, Schwäbisch Gmünd, Alemanha, 2014

// Elytra Filament Pavilion, Victoria and Albert Museum, Londres, Inglaterra, 2016

3.4.3 Um contraponto: Hooke Park – AA School //123

// Woodchip Barn, Dorset, Inglaterra, 2016

3.5 A produção nos trópicos, ou uma ausência //133

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS //138

5. REFERÊNCIAS //146

6. LISTA DE IMAGENS //154

7. ANEXOS //161

1. INTRODUÇÃO

“Há muito conhecimento, mas pouca sabedoria.” (ditado tibetano)

A presente dissertação pretende fazer um apanhado do desenvolvimento recente da computação aplicada à prática arquitetônica alcançando o patamar da robotização de sua produção. Nosso objetivo é definir o estado da arte da produção robótica contemporânea da arquitetura através de novos processos de design computacional desenvolvidos em centros de pesquisa avançada da Europa. Ao identificarmos os dois laboratórios proeminentes no assunto, Gramazio Kohler Research¹, na Suíça, e ICD - Institute for Computational Design and Construction², na Alemanha, escolhemos seus projetos construídos fora do âmbito acadêmico por entender que essa extrapolação compreende uma consolidação da pesquisa desenvolvida até então. Apresentaremos também um projeto desenvolvido no Hooke Park³, campus rural da AA School na Inglaterra, pela distinta abordagem ao processo de design estabelecendo um contraponto aos demais. Como operam? Quais seus objetivos? Em que inovam? São questões que guiam nossa pesquisa na tentativa de entender o direcionamento do pensamento arquitetônico computacional em formação. Propomos aqui, mesmo que parcialmente, preencher uma lacuna temática e temporal existente no âmbito acadêmico brasileiro em tempos líquidos de rápidas transformações.

Essa história começa com a criação do LAMO⁴, o Laboratório de Modelos 3d e Fabricação Digital da FAU-UFRJ, em 2013. Ao surgir aberto e colaborativo, nós estudantes começamos a inventar aquilo que não conhecíamos, oficinas de trabalho, ou workshops, mesclando arquitetura, fabricação digital, arte e eletrônica. Em colaboração com professores de outras faculdades começamos a expandir nossas áreas de conhecimento, engrossando o escopo das nossas experimentações. As Oficinas Transversivas, criadas como evento anual a ocorrer durante o recesso de inverno, começaram com a edição de 2014, Abrigos Sensíveis⁵, que recentemente virou livro (PASSARO et al., 2018). No ano seguinte tivemos o Desafiando a Gravidade⁶, e em 2017, o Em Busca da Forma, Sistemas Generativos⁷. Nesse tempo, tivemos diversos professores convidados e muitos projetos construídos, revivendo o gosto, que se encontrava esquecido, pelo aprendizado através da construção.

1 <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/>

2 <http://icd.uni-stuttgart.de/>

3 <http://hookepark.aaschool.ac.uk/>

4 O LAMO - Laboratório de Modelos 3d e Fabricação Digital pertence ao Programa de Pós-Graduação em Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (PROURB-FAU) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Criado pelo Prof. Dr. Andrés Passaro, em 2013, como laboratório de ensino, pesquisa e extensão, hoje é coordenado pelo Prof. Dr. Gonçalo Castro Henriques. <http://www.lamo.fau.ufrj.br/>

5 <http://www.lamo.fau.ufrj.br/workshops/011abrigos/>

6 <http://www.lamo.fau.ufrj.br/workshops/024gravidade-2/>

7 <http://www.lamo.fau.ufrj.br/workshops/embuscaforma/>

Meu projeto de graduação, Casa Revista⁸, se desenvolveu nesse contexto como pesquisa, financiada pela FAPERJ e pelo CNPQ, e orientada pelos professores Andrés Passaro e Marco Silvano (LEMC – Laboratório de Ensino de Materiais de Construção e Estudo do Solo). Trata-se da primeira WikiHouse⁹ construída na América Latina, um sistema construtivo open source que utiliza desenho e corte digital de chapas de madeira compensada, montadas utilizando apenas encaixes. O projeto da casa é uma versão tropicalizada do sistema, com varanda, beiral e abertura zenital, elementos consagrados da arquitetura residencial popular brasileira, na tentativa de aproximar as tecnologias de fabricação digital à nossa realidade. Ao propor uma nova tecnologia construtiva, explorando seus potenciais localmente, o projeto visou instigar a atualização da produção independente de habitações através da incorporação de tecnologias digitais. Foram muitos modelos reduzidos produzidos no laboratório, primeiro para compreender o sistema, para em seguida manipulá-lo. A prototipagem em escala real foi feita externamente, pois ainda nos falta uma router CNC para equipar o laboratório. Com o projeto definido e aprimorado, oferecemos uma oficina intensiva de fabricação digital para a produção das peças, o LAMO Summer Camp¹⁰. Nela, 15 valentes estudantes aprenderam a operar a máquina e gerar seus códigos de fabricação, cortando 200 chapas naquele verão. Em seguida, partimos para a construção com mais uma oficina aberta, a Construção da Casa Revista, agora com 50 estudantes dispostos a aprender e colaborar com tal empreitada. Foram duas semanas intensas de preparação das peças, montagem, instalações, revestimentos e mobiliário¹¹ (Imagens 1 e 2). Foi um primeiro protótipo que nos mostrou a validade construtiva do sistema, sua facilidade de montagem mesmo por equipe sem nenhuma experiência prévia, e apontou possíveis aprofundamentos e desdobramentos, como por exemplo, sua aplicação como tecnologia social através da extensão universitária (PASSARO e ROHDE, 2014, 2016).

Depois dessa experiência extasiante, onde pudemos viver na prática a aplicação das tecnologias digitais CAD-CAM¹² na produção de arquitetura, ficou a pergunta, o que vem depois? O robô foi a primeira resposta sem antever o que estava por trás de seu uso, o design computacional e suas implicações na disciplina. A pesquisa brasileira neste campo ainda é incipiente, não contamos com braços robóticos aplicados à arquitetura, assim como incipiente é a formulação de uma teoria computacional no panorama global. Tomamos para nós mesmos o desafio de explorar essa vereda, cientes das dificuldades do inexistente. Para tal empreitada é necessário punho forte para abrir caminho para os que virão em seguida, mas também tino para tomar a direção certa, pois sempre há o risco de se abrir uma picada sem saída, e são muitas as vertentes de pensamento quando não há consen-

8 <http://www.lamo.fau.ufrj.br/projetos/academicos/casa-revista/>

9 <https://wikihouse.cc/>

10 <http://www.lamo.fau.ufrj.br/workshops/016summercamp/>

11 Veja o processo aqui: <https://vimeo.com/130312585>

12 A tecnologia de Desenho Assistido por Computador (CAD - Computer-Aided Design) se refere a softwares de desenho e representação que produzem arquivos para fabricação. O processo de Manufatura Assistida por Computador (CAM - Computer-Aided Manufacturing) é feito através de softwares que controlam as máquinas de fabricação (DUNN, 2012, p.186).



so algum. Nos empenhamos aqui em apresentar esse panorama do pensamento e da produção arquitetônica através do uso do robô em processos computacionais, através de seus atores e pensadores mais influentes. Trata-se de um assunto que precisa ser abordado, principalmente nas escolas de arquitetura comprometidas com a formação de arquitetos construtores da realidade que habitamos. Precisamos nos colocar como pensadores críticos da realidade tecnológica que se apresenta hoje, para nos tornarmos atuantes muito em breve.

Utilizaremos aqui o termo design, muitas vezes traduzido como projeto, mas que, no entanto, não comporta a dimensão que

Imagem 1: Casa Revista e alguns membros da equipe LAMO, 2015. Fonte: Acervo LAMO.

Imagem 2: Interior da Casa Revista, 2015. Fonte: Acervo pessoal.

queremos tratar. Projeto, segundo o dicionário Houaiss (2010), é um plano, uma intenção, e também a sua descrição em tarefas, etapas, esquemas ou desenhos. Envolve traçar estratégias, planejar ações futuras. Em contrapartida, design, comumente empregado na área de desenho industrial, é a concepção de um produto, no que se refere à sua forma e funcionalidade, segundo o mesmo dicionário. Design se relaciona com a atividade conceitual de formular uma ideia e por isso lida com o campo da imaginação, mais do que da racionalização. Para Kostas Terzidis (2006, p. 1), design lida com o vago, o ambíguo, e o processo indefinido de gênese, emergência, ou formação. O arquiteto de Harvard resgata o seu significado etimológico a partir de sua raiz grega, associada à incompletude, indefinição, ou imperfeição, mas também à expectativa, ou antecipação, a nossa busca por capturar o elusivo. Seu contexto etimológico também se refere a um passado, que agrega ao design o sentido de algo que já possuímos, mas não temos mais. Algo vago, perdido em algum momento da história que buscamos capturar de estados de esquecimento da memória. Um conceito que se relaciona com a ideia pré-socrática de que nada surge do nada e nada desaparece no nada, mas se encontra em constante transformação. Assim, ao invés de estarmos inventando novas formas, estamos redescobrimo-as através do design.

Segundo Vilém Flusser, filósofo tcheco naturalizado brasileiro, para entender o significado que o termo design contém hoje, é preciso ir além de sua origem e usos históricos, mas analisar semanticamente seu impacto na cultura (2007, p.181). Se os diversos significados históricos de design estão associados a “astúcia” e “fraude”, como “arquitetar um plano”, o termo também se associa a “técnica” e “arte”. Assim, o design hoje faz a conexão entre dois mundos separados na Renascença, o mundo da técnica e das máquinas e o mundo das artes, mas que, no entanto, essa nova cultura tem por trás a conotação de engodo e malícia, de algo que engana.

“Esse é o design que está na base de toda cultura: enganar a natureza por meio da técnica, substituir o natural pelo artificial e construir máquinas de onde surja um deus que somos nós mesmos. Em suma: o design que está por trás de toda cultura consiste em, com astúcia, nos transformar de simples mamíferos condicionados pela natureza em artistas livres.” (FLUSSER, 2007, p. 184)

Flusser é direto e destemido ao apresentar e destrinchar “os aspectos pérfidos e ardilosos da palavra design”, com clara consciência de que até mesmo a construção que faz de seu significado depende do design que escolheu. Tudo depende do design que se encontra na base, tamanha é a importância de sua compreensão.

Em contraposição, computacional é um termo técnico comumente associado a cálculos numéricos, mas que, no entanto, possui uma dimensão muito maior. A computação tem o potencial de ir além do processamento de informações, para alcançar a dedução de resultados através de suas

capacidades associativas, incrementando de novas informações o que inicialmente foi inserido. Para Ahlquist e Menges (2011), arquitetos responsáveis pela formulação de uma antologia do pensamento do design computacional, a questão fundamental do computacional é a interação, que o remove do âmbito estritamente virtual. Como metodologia de design, o computacional formula o específico, através de uma estrutura de negociação e influência de conjuntos de dados com potencial de geração, seja de formas ou estruturas, enquanto processos assistidos por computador já partem do específico para obter o objeto. Gabriela Celani¹³, no prefácio da edição brasileira do livro de William J. Mitchell, *A Lógica da Arquitetura* (2008), do qual é tradutora, nos diz que, apesar de não ser muito conhecido no Brasil, o *computational design* tem suas raízes no Movimento dos Métodos em Projeto¹⁴ (*Design Methods Movement*) dos anos 60, que buscava incorporar o computador de forma eficaz a novos processos de design. A abordagem do design computacional hoje é tanto prática, no desenvolvimento de novas técnicas e processos de design, como teórica, para formular um pensamento computacional aplicado à arquitetura, sendo o último o que apresenta maiores desafios em sua aculturação (MENGES e AHLQUIST, 2011, p.8). Isso talvez se deva ao uso prevaletente do computador apenas para acelerar ou estender capacidades dentro de processos de design estabelecidos, mais do que propriamente computar novos processos. Para atingirmos o cerne do design computacional, muitos conceitos disciplinares são abalados, caminhando em direção a outras áreas do conhecimento, como a biologia, ciência cognitiva, matemática e ciência da computação. Fundamentalmente, o aspecto único do design computacional é a sua abordagem em relação ao processo de design, através de algoritmos que computam o design a partir de parâmetros e relações, uma metodologia dinâmica aumentada e possível apenas através do computacional.

Jane Burry¹⁵ (2011, p. 168) considera design computacional o design que fez a transição do processo de descrição de um objeto para o estabelecimento de um espaço dinâmico de possibilidades. Se antes engajávamos nossos sentidos na concepção de um objeto representado analogicamente ou digitalmente, agora nos engajamos na con-

13 Gabriela Celani, pesquisadora e docente do curso de Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, é responsável pelo LAPAC - Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção, o primeiro laboratório de fabricação digital em ensino de Arquitetura no Brasil. <http://lapac.fec.unicamp.br/>

14 Trata-se de um ponto de inflexão da história no qual a visão passa do objeto para os métodos e processos de projeto, que passam a ser sistematizados. O marco inicial desse movimento foi a Conferência em Métodos Sistemáticos e Intuitivos na Engenharia, Desenho Industrial, Arquitetura e Comunicações (*The Conference on Systematic and Intuitive Methods in Engineering, Industrial Design, Architecture and Communications*) ocorrida em 1962 em Londres. <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/09.105/77>

15 Única autora mulher a figurar na antologia do pensamento computacional compilada por Ahlquist e Menges (2011), Jane Burry tem sua pesquisa direcionada à matemática e à computação no design contemporâneo. Decana da Escola de Design da Swinburne University of Technology, Melbourne, e ex-professora e diretora do Spatial Information Architecture Laboratory (SIAL) na RMIT University.

strução de sistemas de relações, que podem ser formalmente descritas. Não que não houvesse computação antes, na descrição de formas digitais, no sentido original da palavra de calcular e operar algoritmos. Mas a percepção de seu potencial mudou, dando acesso a um espaço de possibilidades, que Burry chama de espaço de estados (*state space*), imensamente maior através do uso de processos computacionais. Achim Menges associa esse espaço de estado do design aos estados de possibilidade do material e da máquina de fabricação, dando ainda mais complexidade ao espaço morfológico¹⁶ do design computacional (MENGES, 2013). A integração entre design e fabricação atingiu um novo patamar através da incorporação de robôs industriais na produção de arquiteturas, que se vê como um campo aberto de possibilidades através dessa ferramenta multipropósito. Nos encontramos em um estágio de desenvolvimento onde o mundo material vai de encontro à lógica computacional em um processo de via dupla de informação. Superamos a hierarquização de projeto e produção como duas etapas separadas e subsequentes, que agora podem dialogar em troca mútua desde o início do design até a sua fabricação. O robô permite enriquecer a natureza física da arquitetura, leva a uma nova materialidade, a ‘materialidade digital’ onde o design é informado pela matéria, constituindo uma nova fase da era digital. Nela, a abordagem passa do objeto para o processo material de sua criação, que revela um novo modo de pensar arquitetura, através de parâmetros, condições, relacionamentos e graus de liberdade (GRAMAZIO e KOHLER, 2008a).

Esse assunto extrapola as experimentações realizadas em centros de pesquisa avançada e se faz pertinente nessa nova fase que adentramos, do hibridismo humano com o virtual, a era pós-humana¹⁷ em que estendemos nossas capacidades para além de nós mesmos. Essa tecnociência multiforme e onipresente associada a um tempo acelerado nos rouba o pensamento crítico, somos assolados por informações e novidades que estão além da capacidade humana de processamento, a realidade nos escorre pelas mãos¹⁸. Vimos nas últimas duas décadas, a computação dar um salto tanto qualitativo quanto quantitativo, e os softwares de modelagem 3D se tornaram imprescindíveis para a disciplina (COLLETTI, 2016). As ferramentas de design têm capacidade de aumentar o poder cognitivo do homem, atingindo novos patamares de complexidade do conhecimento humano, e o robô nos alça a novos patamares de atuação, com sua multiplicidade de usos, precisão e força. A interface entre seres humanos e máquinas

16 Este conceito será tratado mais a fundo em 2.2 Do digital ao computacional.

17 O pós-humanismo possui várias vertentes de pensamento presentes nas áreas da filosofia, arte contemporânea, biotecnologia, ciência cognitiva, futurologia e ficção científica. Segundo Lucia Santaella, professora da PUC-SP: “A condição pós-humana diz respeito à natureza da virtualidade, genética, vida inorgânica, ciborgues, inteligência distribuída, incorporando biologia, engenharia e sistemas de informação. Por isso mesmo, os significados mais evidentes, que são costumeiramente associados à expressão “pós-humano”, unem-se às inquietações acerca do destino biônico do corpo humano.” (SANTAELLA, 2007).

18 Ver Modernidade Líquida de Zygmunt Bauman (1999).

vem transformando o mundo em uma complexa e gigantesca rede de troca de informações. Essa extensão de nossas capacidades limitadas pelas mídias foi abordada pelo teórico canadense Marshall McLuhan, em seu livro *Understanding Media: The extensions of man*, de 1964. Antes mesmo da disseminação de computadores, da internet, e da robotização da produção industrial, McLuhan já previa o futuro da tecnologia através de seu ponto chave: a informação. Se na era mecânica o homem estendeu seus limites do corpo no espaço, chega o momento, a era da informação, onde o homem pode ampliar o poder de sua consciência.

“Today, after more than a century of electric technology, we have extended our central nervous system itself in a global embrace, abolishing both space and time as far as our planet is concerned. Rapidly, we approach the final phase of the extensions of man—the technological simulation of consciousness, when the creative process of knowing will be collectively and corporately extended to the whole of human society, much as we have already extended our senses and our nerves by the various media. Whether the extension of consciousness, so long sought by advertisers for specific products, will be ‘a good thing’ is a question that admits of a wide solution. There is little possibility of answering such questions about the extensions of man without considering all of them together. Any extension, whether of skin, hand, or foot, affects the whole psychic and social complex.” (McLUHAN, 1964, p. 6)¹⁹

O aforismo “o meio é a mensagem”, cunhado por McLuhan, pode ser interpretado de diversas formas, e carrega esse sentido amplo do impacto mais profundo das tecnologias na percepção humana sobre si mesma e sobre o mundo. A tecnologia em si carrega uma mensagem particular e sutil independente da mensagem explícita que leva. Esse pode ser um ponto de partida para compreendermos o impacto do digital não só na sociedade, mas no processo criativo dos arquitetos que fazem uso dessas tecnologias.

Como muitas das ciências, a arquitetura também adentrou a era da simulação computacional, permitindo usar seu potencial para além da eficiência, mas para a emergência do design em uma estrutu-

19 “Hoje, após mais de um século de tecnologia elétrica, estendemos nosso próprio sistema nervoso central em um abraço global, abolindo tanto o espaço quanto o tempo no que diz respeito ao nosso planeta. Rapidamente, nos aproximamos da fase final das extensões do homem – a simulação tecnológica da consciência, quando o processo criativo do conhecimento será coletivamente e corporativamente estendido à toda sociedade humana, assim como já estendemos nossos sentidos e nossos nervos através de várias mídias. Se a projeção da consciência, tão buscada por anunciantes para produtos específicos, será uma ‘boa coisa’, é uma questão que admite variadas soluções. São poucas as possibilidades de responder a essas questões relativas às extensões do homem, se não levarmos em conta todas as extensões em conjunto. Qualquer extensão, seja de pele, mão ou pé, afeta todo o complexo psíquico e social.” Tradução da autora.

ra complexa de interações. São muitas novas mídias que dão suporte à criação e entendê-las se torna fundamental para usufruí-las. Vilém Flusser faz uma analogia da evolução das mídias com os degraus de uma escada, que foram alçados um a um pela humanidade ao longo da história²⁰. Em seu livro de 1985, *Into the Universe of Technical Images*, Flusser afirma que chegamos à era onde imagens suplantaram textos, e deixamos de pensar de forma linear e histórica para viver um contexto, uma cena. As imagens tradicionais foram substituídas por imagens técnicas e isso transforma radicalmente nossas experiências, percepções, comportamentos e valores. As primeiras, Flusser define como imagens criadas a partir da observação do mundo, são representações, enquanto as últimas surgem da computação de conceitos, são gerações, as quais associa a um “poder alucinante que perdeu sua fé em regras.”(1985, p.10). Se as imagens tradicionais precedem os textos, as imagens técnicas sucedem os textos altamente evoluídos que desenvolvemos, constituindo uma revolução cultural. A escada que ascendemos nos leva do universo da experiência concreta ao universo das imagens técnicas, nos distanciando cada vez mais da verdade da realidade através de nossas projeções criadas.

Segundo o autor, no primeiro degrau habitávamos o mundo da experiência concreta, o espaço-tempo 4D do mundo animado. Nesse momento pudemos segurar o mundo em nossas mãos, gerar uma ação, que cria objeto e sujeito. Este universo de objetos pode ser transformado e informado, e ao atuarmos nele criamos cultura. Esse foi o momento da cisão, da dualidade entre homem e universo, onde deixamos de viver a experiência concreta para viver através de projeções criadas. Passamos então para o segundo degrau, do universo 3D de objetos que podem ser agarrados e moldados, como as lâminas feitas de pedra desse período. Se atuamos com as mãos, são nossos olhos que monitoram esse mundo. Ao formular relações para planejar ações começamos a construir modelos traduzindo-os em imagens. No terceiro degrau dominamos um universo 2D da representação imagética, observamos e imaginamos o mundo em que habitamos, representando uma situação e o assunto que a envolve através das pinturas em cavernas. Ao extrairmos conceitos dessas representações mágicas do mundo, as explicamos e simplificamos. Agarramos seu significado e extraímos uma de suas dimensões, reduzindo a imagem a uma dimensionalidade linear da escrita. No quarto degrau criamos uma nova interface entre homem e suas imagens, a escrita. Chegamos ao nível da compreensão e explicação do mundo através de uma nova mídia, produzindo textos, cálculos e narrativas que perdem a magia do universo das imagens tradicionais. A partir do momento que compreendemos que sua sintaxe não faz sentido, não pertence à natureza,

20 Para um panorama ainda mais ancestral da nossa evolução cognitiva que deu início ao desenvolvimento da linguagem ver Merlin Donald, *Origins of the Modern Mind* (1993). Nele o autor cruza dados da neurociência, psicologia, arqueologia e antropologia para formular uma teoria de 3 estágios evolutivos: a cultura episódica, a cultura mimética e a cultura mítica, na qual adquirimos a habilidade de construir modelos conceituais.

mas à uma invenção humana, reconhecemos que as regras do jogo podem também ser diferentes do que são, e com esse reconhecimento, os fios uma vez ordenados finalmente colapsam e perdem coerência. O que nos resta são partículas sem dimensões que não podem ser apreendidas nem representadas nem compreendidas, mas podem ser computadas. No quinto degrau, o nível das imagens técnicas, os textos passam a ser inacessíveis, colapsam em partículas a serem rearranjadas através da computação, um universo adimensional e imaginário capaz de criar imagens técnicas de nossas mais complexas projeções. Um novo tipo de magia é produzida, com grande capacidade simulatória ao dissimular seu simbolismo, como se imagem e mundo se encontrassem no mesmo nível do real (FLUSSER, 1983).

As imagens tradicionais e as imagens técnicas são ambas distanciadas da experiência concreta, mas cada uma a sua maneira, pois surgem de diferentes contextos. A imagem tradicional abstrai duas dimensões do fenômeno concreto, a imagem técnica abstrai uma das dimensões da imagem tradicional para resultar em textos que reconstituem a dimensão abstraída, a fim de resultar novamente em imagem. “Ontologicamente, as imagens tradicionais imaginam o mundo, as imagens técnicas imaginam textos que concebem imagens que imaginam o mundo.” (FLUSSER, 1983, p. 10). Flusser nos fala das imagens técnicas no contexto da fotografia ao defender a construção de uma filosofia da caixa preta, mas que, no entanto, se aplica ao universo dos *renders* criados por computador, as imagens técnicas criadas por nós arquitetos (Imagem 3). As imagens técnicas são difíceis de decifrar, mesmo que não aparentem tal necessidade de serem decifradas. Vemos muitas vezes o observador confiar nas imagens técnicas tanto quanto confia em seus próprios olhos, sem perceber, ingenuamente, o aparato estrutural de um discurso que a constrói, e é nessa ausência de questionamento que o poder das imagens técnicas se sustenta.



Imagem 3: Workshop Em Busca da Forma, 2017. Anael Alves, Loan Tammela e Felipe Lannes. Fonte: Acervo LAMO.

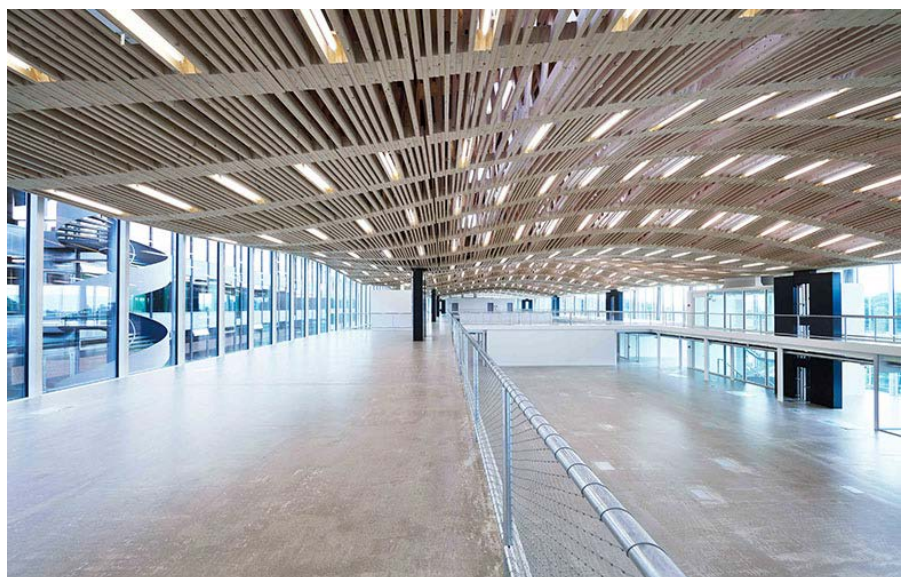
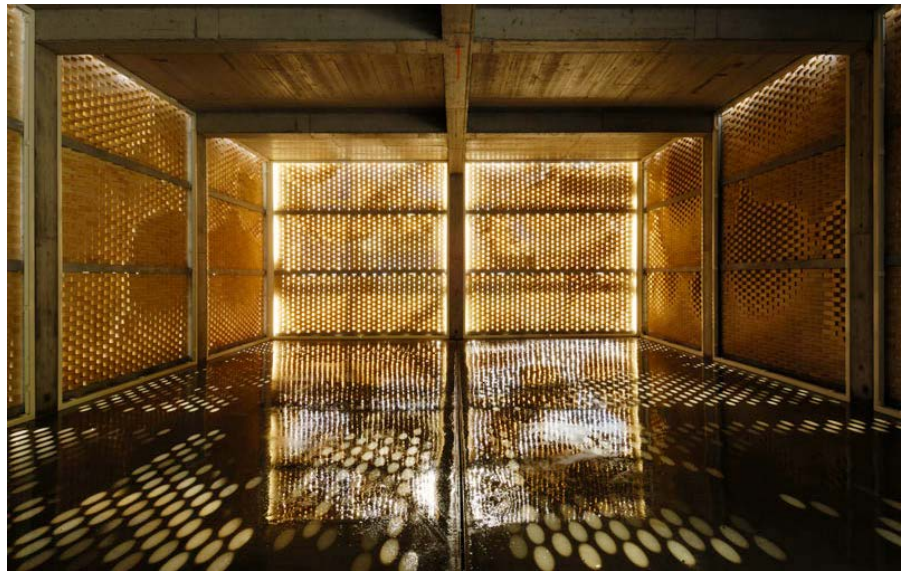
“Images appear as no one before could ever have dreamed they would. And the photographs, films, and television and video images that surround us at present are only a premonition of what envisioning power will be able to do in the future. Only when we focus on computer-synthesized images, images of the nearly impossible because ungraspable, unimaginable, and incomprehensible, can we start even to suspect what sort of hallucinatory power is at hand.

Envisioners press buttons to inform, in the strictest sense of that word, namely, to make something improbable out of possibilities. They press buttons to seduce the automatic apparatus into making something that is improbable within its program. They press buttons to coax improbable things from the whirring particle universe that the apparatus is calculating. And this improbable world of envisioning power surrounds the whirring particle universe like a skin, giving it a meaning. The power to envision is the power that sets out to make concrete sense of the abstract and absurd universe into which we are falling.” (FLUSSER, 1985, p.37)²¹

A investigação aqui conduzida vai em busca da compreensão desse poder que nos foi dado de imaginar um futuro para a arquitetura bem no início de um movimento, do design computacional de arquiteturas robóticas. De tão novo, seu pensamento está sendo escrito agora, nesse exato momento. Sua teoria parte da intersecção entre ciência, tecnologia, design e cultura arquitetônica, e para compreender a prática de hoje, vamos em direção à evolução das tecnologias digitais não apenas por seu ferramental, mas pelo pensamento que embasa essa prática. Nos interessa analisar a fundo alguns processos possíveis de abordagem computacional, identificando o pensamento daqueles que escrevem essa história através de seus estudos práticos. Assim, teremos um panorama da produção dominante onde poderemos identificar evoluções, conjunções e divergências, ganhando capacidade crítica, para muito em breve desenvolver uma produção tropical através desses novos meios de design. Essa dissertação se empenha em esclarecer o universo da teoria do design computacional, pois é através da conscientização da práxis que iremos nos apossar da liberdade adquirida, sabendo de onde vem e para onde vai.

21 “As imagens se apresentam como ninguém antes jamais poderia ter sonhado que iriam. E as fotografias, filmes e imagens de televisão e vídeo que nos cercam no momento são apenas uma premonição do que o poder visionário poderá fazer no futuro. Somente quando nos concentramos em imagens sintetizadas por computador, imagens do quase impossível, porque inatingíveis, unimagináveis e incompreensíveis, poderemos começar a suspeitar que tipo de poder alucinatório temos em mãos.

Os visionários pressionam botões para informar, no sentido mais estrito da palavra, a saber, fazer algo improvável a partir de possibilidades. Eles pressionam botões para seduzir o aparato automático a fazer algo que é improvável dentro de seu programa. Eles pressionam botões para persuadir coisas improváveis desse universo ruidoso de partículas que o aparato está calculando. E esse mundo improvável de poder visionário envolve o universo ruidoso de partículas como uma pele, dando-lhe um significado. O poder de imaginar é o poder que se propõe a dar sentido concreto ao universo abstrato e absurdo no qual estamos caindo.”. Tradução da autora.



Escolhemos para ilustrar a produção robótica da arquitetura por novos processos computacionais alguns projetos-síntese que delinearam o curso dessa história, onde consolidam um pensamento experimental. Do grupo Gramazio Kohler Research, do Instituto Federal de Tecnologia Suíço, selecionamos o seu projeto de estreia, do início dessa colaboração entre homem e robô, o Gantenbein Vineyard Façade (Imagem 4). Foi a primeira fachada não-padronizada de tijolos produzida com o auxílio do robô, que não trouxe novidades em relação ao processo de design digital, mas em seu processo de produção. Dez anos depois, trazem novamente essa tecnologia aplicada à arquitetura com o projeto The Sequential Roof (Imagem 5), desenvolvido em parceria com a indústria na exploração da automação de processos não-padronizados para a construção em madeira. São dois projetos que revelam o foco do instituto na aplicabilidade das novas tecnologias no campo prático da arquitetura, dando início a uma nova fase construtiva através do uso do robô.

Imagem 4: Gantenbein Vineyard Façade, 2006. Fonte: Gramazio Kohler Research.
Imagem 5: The Sequential Roof, 2016. Fonte: ETH-Zurich, Arch_Tec_Lab.

Já o ICD - Institute for Computational Design and Construction, da Universidade de Stuttgart, se volta para o extrapolamento de



Imagem 6: Landesgartenschau Exhibition Hall, 2014. Fonte: ICD.

Imagem 7: Elytra Filament Pavilion, 2016. Fonte: ICD.

barreiras no design computacional morfo-genético. A consolidação de seus experimentos desenvolvidos anualmente em forma de pavilhão em colaboração com o ITKE - Institute of Building Structures and Structural Design pode ser vista em dois projetos externos, desenvolvidos como pavilhões expositivos. O Landesgartenschau Exhibition Hall (Imagem 6), de 2014, foi a primeira casca de superfície-ativa²² segmentada construída em placas de madeira compensada, uma estrutura permanente de apoio a exposições. O Elytra Filament Pavilion (Imagem 7), montado duas vezes²³, em 2016 e 2017, consolida uma técnica que emprega fibra composta de forma inovadora na arquitetura, através da deposição diferenciada que elimina a necessidade de moldes.

22 “Sistemas estruturais de superfície-ativa são sistemas de superfícies flexíveis, mas resistentes à compressão, tensão e cisalhamento, nos quais a redistribuição de forças é efetuada pela resistência da superfície e uma forma de superfície especial. Os elementos do sistema são primariamente sujeitos a esforços de membrana, isto é, esforços que atuam paralelamente à superfície. As características típicas desta estrutura são: estrutura com delimitação espacial e forma de superfície.” (ENGEL, 1997, p.213)

23 Em 2016 no Victoria & Albert Museum, e em 2017 no Vitra Design Museum.

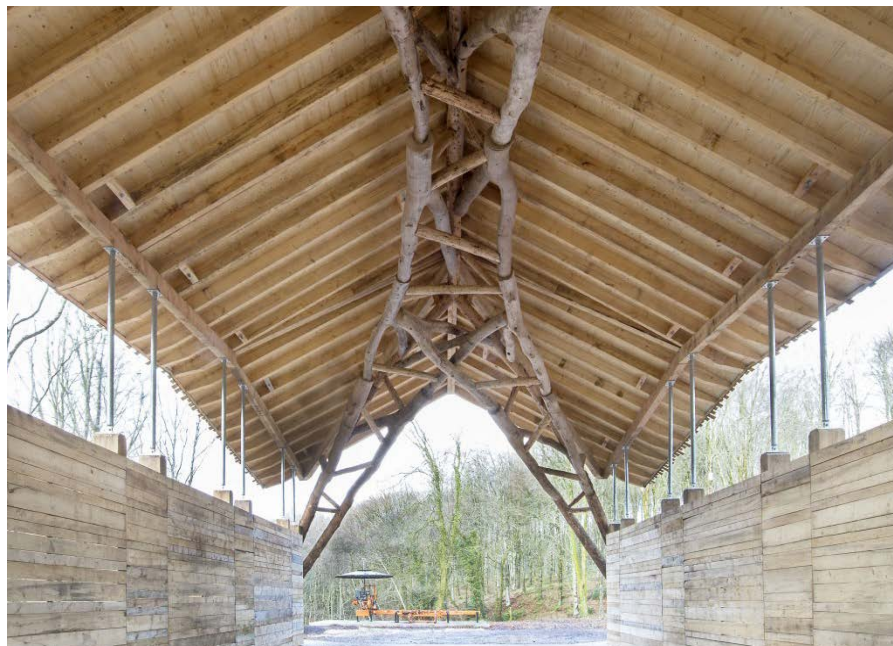


Imagem 8: Woodchip Barn, 2016. Fonte: Dezeen.

Um quinto projeto é apresentado, o Woodchip Barn (Imagem 8), de 2016, que não pertence a uma linha exploratória consolidada na aplicação do robô em processos de design, mas um exemplar com uma abordagem diferenciada dos demais. Seus princípios seguem a linha investigativa desenvolvida no campus rural da AA School, o Hooke Park, com sua vocação para a exploração da matéria bruta e suas qualidades intrínsecas.

1.1 Estrutura da dissertação

Após o esclarecimento de alguns conceitos e o estabelecimento dos objetivos, a estrutura metodológica do presente trabalho se divide em duas partes que se complementam: **2. Arquitetura e tecnologias digitais** e **3. Fabricação robótica de arquiteturas digitais**. Na primeira, vamos em busca do discurso teórico das últimas décadas na tentativa de mapear a transformação do pensamento sobre o digital rumo ao computacional, afim de entender a constituição da produção atual do design computacional. Na segunda vamos em direção ao robô para entendê-lo não como ferramenta, mas como parte da epistemologia da arquitetura computacional ao implementar transformações na abordagem ao design. Nela veremos a fundo processos de design computacional e fabricação robótica para entender suas lógicas e operativas na tentativa de abrir um debate nos trópicos.

Faremos ao longo do trabalho alguns apanhados históricos com enfoques distintos, e o primeiro deles em **2.1 Informatização e computação** veremos o desenvolvimento da computação dentro da relação entre arquitetura e tecnologias digitais, seu desenvolvimento como ferramenta e como conceito através do posicionamento de seus desenvolvedores. Em seguida, em **2.2 Do digital ao computacional**,

passaremos para o entendimento teórico da disciplina marcada por duas viradas digitais, a primeira com novas explorações formais e a possibilidade de uma produção diferenciada, não mais padronizada, e a segunda quando ela realmente se torna computacional através da maestria do domínio da informação dentro do processo de design. Em **2.3 Como computar?** faremos um novo apanhado com foco na relação entre máquina e homem, na linguagem e na lógica desenvolvidas para realizar essa comunicação entre dois mundos. E veremos que estes não mais se encontram separados, mas mesclados dentro de sistemas ciber-físicos²⁴ de produção.

No capítulo **3. Fabricação robótica de arquiteturas digitais**, veremos o estado da arte da produção de arquiteturas digitais através do uso do robô, começando pela sua diferenciação das demais máquinas de fabricação digital em **3.1 O robô**. Partiremos para um novo apanhado histórico em **3.2 A produção robótica da arquitetura** onde veremos seus precedentes e as diferenças de abordagem entre as duas ondas de apropriação robótica da arquitetura. Em **3.3 A pesquisa avançada** veremos a infraestrutura e as condições em que essas pesquisas se desenvolvem. Vamos em seguida para **3.4 Os estudos de caso**, onde buscamos entender como os processos se dão, dentro de um leque de possibilidades. São projetos de tempos, técnicas e abordagens diferentes na tentativa de construir um mosaico incompleto, que convidamos a ser preenchido em seguida, em **3.5 A produção nos trópicos, ou uma ausência**. Nesta etapa identificamos nosso atraso tecnológico como uma vantagem para o desenvolvimento de um pensamento crítico tropicalizado, para nos apossarmos com propriedade do real potencial dessas ferramentas quando aqui aportarem.

Em **4. Considerações finais**, retomamos os pontos principais desenvolvidos ao longo do trabalho, cruzando as diferentes abordagens ao computacional vistas através do estudos de caso, para nos questionarmos sobre o direcionamento dessa prática que está sendo criada agora, no mundo pós-humano cheio de possibilidades.

24 Sistemas ciber-físicos (CPS – cyber-physical systems) se refere à integração de processos computacionais a processos físicos de produção.

2. ARQUITETURA E TECNOLOGIAS DIGITAIS

Neste capítulo nos interessa apresentar a evolução da relação entre a arquitetura e as tecnologias digitais, partindo de início do desenvolvimento das máquinas utilizadas pelos arquitetos, e seu entendimento sobre a computação. Nessa evolução podemos identificar autores e atores que influíram no desenrolar da história, e que estiveram sempre em busca da maneira mais inteligente²⁵ de utilizar a tecnologia, e por isso mais potente na quebra de paradigmas da era computacional. Ao entendermos as origens das máquinas, buscamos entender o ferramental que temos hoje disponível à nosso ofício em relação à visão que se tem dele. É importante ressaltar que trata-se de apenas uma história²⁶, e não a história dessa evolução. Toda narrativa construída segue um fio condutor dentre muitos possíveis, mostra uma visão particular extraída da meada, e não fatos absolutos.

Seguimos na seção seguinte, na investigação sobre o design e sua transformação, tanto em relação a processos como ao entendimento de seu potencial, a retomada de consciência do computacional sobre o digital. Esse período é marcado por duas grandes viradas digitais que trouxeram novos paradigmas e novos estilos de expressão, encontrando-se o último ainda em construção. Por fim, chegaremos à relação em si entre homem e máquina para entendermos como esse diálogo se dá, a linguagem e a lógica utilizadas, com o intuito de plantar essa semente aqui mesmo, nas escolas de arquitetura brasileiras, chamando a atenção para essa questão fundamental: a programação e o atual analfabetismo brasileiro.

Se hoje podemos colher os frutos e apreciar os botões que florescem da aplicação da computação, precisamos antes de tudo, saber onde deitam suas raízes. É preciso ter consciência que as tecnologias não são neutras, aliás, nem boas e nem más (LÉVY, 1990, p. 196), mas que incorporam aquilo que seus criadores quiserem, tudo que o engenho humano for capaz de programar. Se hoje desfrutamos da liberdade de caminhar virtualmente por ruas de qualquer cidade

25 Em referência a Mario Carpo que constantemente utiliza o termo '*digitally intelligent architects*' (CARPO, 2017).

26 A escritora Chimamanda Ngozi Adichie nos alerta sobre o perigo de se adotar uma única história como verdade em sua fala no TED Talk de junho de 2009: https://www.ted.com/talks/chimamanda_adichie_the_danger_of_a_single_story

do mundo através do Google Street View²⁷, precisamos lembrar que essa tecnologia foi pensada para o controle e vigilância que violam os direitos de privacidade dos cidadãos. Se, como veremos a seguir, os propósitos que configuraram as primeiras décadas do desenvolvimento computacional foram bélicos, será que os motivos de hoje são realmente pacíficos?²⁸

2.1 Informatização²⁹ e computação

“The real emphasis lies in the endeavour to contextualize the progress of digitality in wider terms than processes and technology, that is, in terms of cultural production.” (COLLETTI, 2013, p. 17)³⁰

Dispositivos de lógica computacional³¹ datam de muito antes, mas os primeiros computadores eletrônicos digitais binários, que se assemelhavam mais com máquinas calculadoras um pouco mais poderosas começaram a surgir nos Estados Unidos e na Europa des-

27 A tecnologia Google Street View foi desenvolvida na Universidade de Stanford, patrocinada pela Google, e lançada em 2007. A partir de 2009 veio a público que a empresa não apenas fotografava as cidades, mas coletava dados pessoais através de redes privadas, como mensagens pessoais e senhas. Uma postura que antigamente era denominada ‘espionagem estatal’ hoje é praticada por empresas privadas que comercializam dados, os quais podem ser acessados pelo Estado (SOARES, 2011). Disponível em: <http://www.ciberlegenda.uff.br/index.php/revista/article/download/474/284>. Além disso, a inteligência artificial disponível hoje em dia torna possível a análise dessas imagens capturadas nos espaços públicos para gerar dados sobre a população (renda, raça, hábitos de consumo e afinidade política). <https://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/human-factors/deep-learning-and-google-street-view-can-predict-neighborhood-politics-from-parked-cars>. O uso que se faz dessas informações pode ser visto aqui: https://youtu.be/Im_SpOdacVY

28 Ver LLACH, Daniel Cardoso. Algorithmic Tectonics: How Cold War Era Research Shaped Our Imagination of Design. In: PETERS, Brady; KESTELIER, Xavier de (eds.). *Computation Works: The building of algorithmic thought*. Architectural Design, Profile n 222. Londres: John Wiley & Sons, 2013.

29 O termo em inglês apresentado por Terzidis (2006) é “*computerization*”, confrontado com “*computation*”. Optei por traduzir como “informatização” e “computação”, mas não há consenso sobre a sua tradução ao português. Em conversa com a Professora Gabriela Celani e o Professor Gonçalo Castro Henriques, Gabriela sugeriu manter o termo original em inglês e Gonçalo opta pela tradução “computorização”. Minha opção por traduzir vai em direção à aproximação do tema ao universo brasileiro, permitindo que nos apropriemos dele. “Computorização” é encontrado na Língua Portuguesa de Portugal, no Brasil temos “computadorização”. A escolha por “informatização” foi feita por se aproximar do sentido que Terzidis atribui a “*computerization*”, que veremos mais à frente. No Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa Michaelis Online temos: Informatização: Ato ou efeito de informatizar. Informatizar: Adaptar um fato, processo ou serviço ao sistema da informática; Instalar sistema de computadores em empresa, escola, clube etc. <http://michaelis.uol.com.br/>

30 “A ênfase real está no esforço de contextualizar o progresso da digitalidade em termos mais amplos do que processos e tecnologia, isto é, em termos de produção cultural.” Tradução da autora.

31 O mais antigo que se tem conhecimento é a máquina de Anticítera, datada em cerca de 100 a.C., e utilizada para prever posições astronômicas e eclipses em uma época regulada pelos ciclos lunares e solares. Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_de_Antic%C3%ADtera

encadeadas pela Segunda Guerra Mundial (GERE, 2002, p. 18). Considerado por muitos³² o primeiro computador da história, o Atanasoff-Berry Computer – ABC de 1939 foi desenvolvido na faculdade de física da americana Iowa State College. O Z3 foi o primeiro computador programável, criado pelo alemão Konrad Zuse, lançado em Berlim em 1941 para realizar cálculos aerodinâmicos. Em 1944 foi implementado o Mark I, desenvolvido em Harvard, e utilizado pela marinha americana, foi a maior calculadora digital automática de larga escala construída, com suas 5 toneladas. O ENIAC – Electronic Numerical Integrator and Computer lançado em 1946 representou um grande salto na computação, pois foi o primeiro computador digital eletrônico³³ baseado na máquina universal de Turing³⁴, e sua principal finalidade era realizar cálculos balísticos para o governo americano (Imagem 9). Sua programação foi desenvolvida por 6 pesquisadoras matemáticas, esquecidas pela história³⁵, da Universidade da Filadélfia antes mesmo de existir uma linguagem de programação, usando apenas diagramas lógicos. Como suas unidades de computação não eram capazes de armazenar essas programações precisavam ser reconectadas por cabos a cada nova operação, o que Axel Kilian chama de “proto-programação” (KILIAN, 2017a, p. xx). As máquinas de hoje funcionam sob a mesma lógica matemática de outrora, capazes de processar informações através de operações binárias, mas contamos com um desenvolvimento eletrônico que aumentou enormemente a capacidade de computação de informações.

O primeiro sistema computacional foi estabelecido no final da década de 50, o SAGE – Semi-Automatic Ground Environment, pela força aérea americana (DUNN, 2012, p. 14-19). Tratava-se de uma rede de computadores associados que coletavam dados de diversos radares e processavam a informação gerando um mapa unificado do espaço aéreo americano. Esse sistema desenvolvido pela IBM implementou avanços como exibição em vídeo, memória artificial e processos de tradução de informação. Seus propósitos seguiam sendo bélicos e um aspecto fundamental desses dispositivos era a sua eficiência, capazes de calcular e articular respostas imediatas a invasões do espaço aéreo americano com processamento em tempo real³⁶. Paralelamente aos avanços técnicos computacionais, estavam sendo desenvolvidos avanços na robótica, com as primeiras máquinas de controle numérico, assim como do pensamento sobre essa relação homem-máquina.

32 Após disputas judiciais sobre a credencial da invenção do computador, foi declarado em 1973 que computador, como um conceito, não é patenteável. Fonte: <http://www.computerhistory.org/timeline/computers/>

33 Os dispositivos anteriores eram eletromecânicos. Fonte: <http://www.computerhistory.org/timeline/computers/>

34 A Máquina de Turing Universal – MTU é um modelo matemático equivalente à uma máquina digital, criada por Alan Turing na década de 30. Com esse modelo, que Gere (2002, p. 22) chama de ‘brinquedo filosófico’, Turing conceitualizou o computador moderno, uma máquina binária que pode ser configurada em n diferentes estados.

35 Ver <http://eniacprogrammers.org/>

36 <https://www.ll.mit.edu/about/History/SAGEairdefensesystem.html>

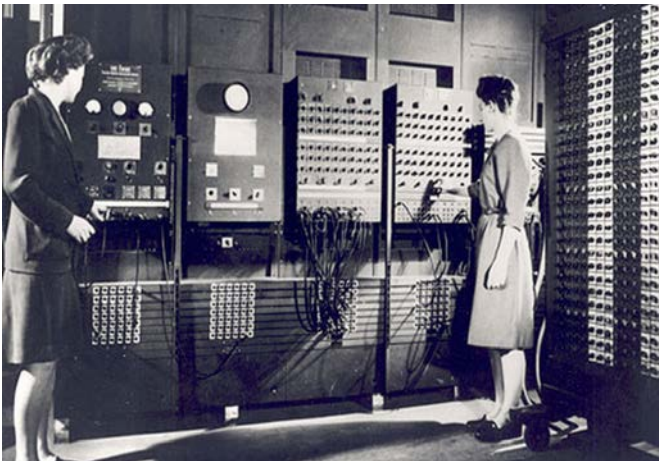


Imagem 9: ENIAC, 1946. Fonte: Public Radio International

Imagem 10: IBM System/360, 1965. Fonte: Computer History Museum



Inteligência artificial, cibernética, teoria dos sistemas foram desenvolvidas nesse momento para guiar a nova interface que estava sendo criada. Fez-se necessário desenvolver uma visão sistêmica para compreensão e controle da complexidade dessas novas relações.

Os computadores passaram a ser mais palpáveis, pelo menos a grandes empresas, extrapolando o âmbito institucional estatal com o IBM System/360 durante a década de 60 (Imagem 10). A empresa lançou uma família de computadores compatíveis entre si que poderiam assumir diversas configurações, tornando esses módulos mais fáceis de serem assimilados nos espaços de trabalho³⁷. Mesmo que até o início dos anos 90 poucos escritórios de arquitetura possuíssem computadores aplicados ao projeto (tarefas administrativas e repetitivas como contabilidade estavam em vantagem em relação ao uso dessa ferramenta), os primeiros sistemas CAD foram desenvolvidos ainda na década de 60. Ivan Edward Sutherland em 1963 desenvolveu o Sketchpad dentro do MIT, e ao importar tecnologias desenvolvidas para o SAGE, criou o primeiro sistema gráfico de desenho que inovou o método de comunicação entre homem e máquina (Imagem11). Seu trabalho introduziu a ideia de imagem ou objeto virtual, que Gere associa ao início da computação gráfica e da realidade virtual (GERE, 2002, p. 69). Segundo Menges e Ahlquist (2011, p. 12), Sutherland, “aplicou a ideia de restrições (*constraints*) que podem ser variadas testando e flexibilizando as relações entre as geometrias na formação de um sistema geral”. As geometrias eram geradas dentro do sistema através de instâncias paramétricas, ou seja, possuíam uma natureza estruturada, e podiam ser controladas por regras associadas à forma, espaço ou estrutura. O pioneirismo maior do Sketchpad foi implementar uma metodologia fundamentada na associação e geração formal por sistemas baseados em regras, ou seja, a intenção computacional já se encontrava presente desde o início ao revelar um sistema de inter-relações. Foi a partir dessa visão sistêmica implementada à arquitetura que se identificou a transição da sua concepção como um objeto material para um sistema de inter-relações entre diversos sistemas (MENGES e AHLQUIST, 2011, p. 13).

37 https://en.wikipedia.org/wiki/IBM_System/360



Os métodos de modelagem de curvas complexas também começaram a ser desenvolvidos na década de 60, na indústria automobilística. As curvas e geometrias que os “designers” tradicionais de barco produziam manualmente agora precisavam ser digitalizadas para a linha de montagem industrial e Paul de Casteljaou, na Citroen, e Pierre Bézier, na Renault, foram pioneiros nesse processo (KILIAN, 2017a, p. xxii). As curvas e superfícies derivadas de pontos de controles – *splines*³⁸ e NURBS³⁹ - não apenas ofereceram aos designers curvaturas mais suaves e manipuláveis, mas suas aplicações hoje permitem um maior controle de tempo em animações computadorizadas e no movimento de robôs⁴⁰.

Imagem 11: Ivan Sutherland e o Sketchpad GUI-based (Interface gráfica do usuário), 1962. Fonte: History of Computers

Imagem 12: Arch Mac, MIT, 1967. Fonte: Radical Pedagogies

Em 1967 foi fundado o laboratório Arch Mac - Architecture Machine Group, no MIT, pelo influente Nicholas Negroponte, juntamente com Leon Groisser e Jerome Wiesner. O laboratório (Imagem 12), que em 1985 se transformou no MIT Media Lab, já começou multidisciplinar, mesclando a pesquisa e o ensino da arquitetura à engenharia de software e computação, onde os alunos aprendiam a programar e utilizar diversos dispositivos de *input/output*. Seu maior financiador, assim como a grande maioria dos laboratórios do MIT e até mesmo outros institutos americanos de pesquisa, seguia sendo a Agência de Pesquisa do Departamento de Defesa dos Estados Unidos (STEENSON).

Em seu artigo *Towards a Humanism Through Machines*, de 1969, Negroponte identifica três maneiras de utilizar as máquinas no processo de projeto: primeiro através da automação, acelerando e reduzindo custos de práticas existentes; segundo através da alteração

38 “Spline: Curva definida matematicamente por dois ou mais pontos de controle e um conjunto de polinômios. Esse sistema de definição de curvas, também chamado de curva paramétrica, é largamente utilizado na computação gráfica.” (CELANI, G. 2008, p. 289).

39 “NURBS (Non Uniform Rational B-Spline): são representações matemáticas de geometria 3D que podem descrever com precisão qualquer forma, desde uma simples linha 2D, círculo, arco ou curva até a mais complexa superfície orgânica de forma livre 3D ou sólido. Devido à sua flexibilidade e precisão, os modelos NURBS podem ser usados em qualquer processo, desde a ilustração e animação até a fabricação. <https://www.rhino3d.com/nurbs>. “A grande vantagem de curvas e superfícies criadas por NURBS trata da sua alta capacidade de ser manipulada, através de pontos de controle, pesos e nós (DUNN, 2012, p.40).”

40 Ver também o artigo: <http://www.alatown.com/spline-history-architecture/>; a palestra de Mario Carpo: <https://youtu.be/UVerq5DSdKU>; e Carpo (2017, p.55-56).

de alguns métodos projetuais que são compatíveis com a máquina para que caibam em sua constituição e especificidades; e terceiro, o processo considerado evolutivo, pode ser introduzido em um mecanismo evolutivo, desenvolvendo resiliência, crescimento e treinamento mútuo, ou seja, um aprendizado.

Ao Arch Mac, desde o princípio, interessa a terceira alternativa, encarando a questão como uma relação entre duas espécies, máquina e homem, conduzindo dois processos, design e computação, onde um informa o outro, gerando aprimoramento (NEGROPONTE, 1969). Essas foram as bases dos processos computacionais aplicados à arquitetura que mais significativamente influenciaram e seguem influenciando o direcionamento da prática, mas claro, diversas outras maneiras não tão inteligentes de utilizar a máquina também foram desenvolvidas. Ainda na década de 60, o autor deixa clara a diferença entre “assistido por computador” (*computer aided*) e “informatizado”⁴¹ (*computerised*). As tecnologias “assistidas por computador” vão além do mero processamento de dados, mas pressupõe um diálogo, o que demanda inteligência da máquina. Essa definição difere muito do que ficou conhecido como CAD posteriormente – desenho assistido por computador, o primeiro estágio fora da mídia tradicional do papel. Essa abordagem de projeto informatizado, largamente implantada nos escritórios de arquitetura, se limita ao desenho descritivo e alguma capacidade de automação de análises.

Segundo Sutherland, citado por Negroponte (1975), a diferença entre o desenho a mão e o desenho no computador é que o primeiro constitui apenas marcas sujas no papel, enquanto o segundo, o desenho digital possui uma estrutura inerente baseada na estrutura topológica e geométrica construídas na memória do computador, resultante das operações de desenho. Acontece que muitos softwares utilizados na arquitetura até hoje se baseiam na lógica do papel, são marcas definidas pelo arquiteto na tela do computador, com pequena vantagem de processamento e automatização das informações inseridas, mas estas não são computadas para gerar novas informações, são apenas organizadas, otimizadas.

Outra grande referência do pensamento computacional desde os primórdios da sua integração à arquitetura é William Mitchell, que também se juntou ao MIT mais tarde. Seu artigo de 1975, *The Theoretical Foundation of Computer-Aided Architectural Design*, trata do assunto que virou livro dois anos depois e estabelece os fundamentos do design assistido por computador. Para ele, o computador havia sido bem sucedido até o momento em sua aplicação a tarefas bem definidas do processo de design, e o que constituía terreno a ser explorado, era justamente em relação aos problemas “menos bem definidos”⁴². No

41 Tradução da autora. Segundo o Cambridge Dictionary, Computerize: to use a computer to do something that was done by people or other machines before. <https://dictionary.cambridge.org/>

42 Problemas mal-definidos (*wicked problems* ou *ill-defined problems*): Nigan Bayazit

Níveis de pretensão no uso de sistemas CAD					
Grau de Ambição	Funções da Máquina	Funções Humanas	Crítérios para geração	Crítérios para avaliação	Exemplos
Menor	Representação de alternativas	Geração e avaliação de alternativas	Bem ou mal definidos	Bem ou mal definidos	Sistemas de gerenciamento de banco de dados programáticos e descritivos de edifícios, produção de perspectivas e desenho executivos, etc.
Médio Baixo	Avaliação de alternativas	Geração de alternativas	Mal definidos	Bem definidos	Sistemas de avaliação térmica, acústica, lumínica, estrutural, etc.
Médio	Geração de alternativas	Avaliação de alternativas	Bem definidos	Mal definidos	Enumeração sistemática de todas as alternativas de organização de uma planta, onde a seleção da melhor depende de conceitos arquitetônicos sutis
Médio Alto	Geração e avaliação de alternativas	–	Bem definidos	Bem definidos	Programas de otimização
Alto	Geração e avaliação de alternativas	–	Mal definidos	Mal definidos	CAD inteligente

Imagem 13: Níveis de pretensão do uso de sistemas CAD. Fonte: CELANI et al., 2007

artigo, categoriza os diferentes níveis de ambição do arquiteto ao utilizar a máquina para compartilhar tarefas do processo de design. Seu estado menos ambicioso, emprega a máquina em tarefas de representação, sendo responsabilidade do humano gerar e avaliar a solução. Subindo o nível de ambição, a máquina pode ser usada na tarefa de avaliar a solução, através de critérios bem definidos, no campo estrutural, acústico, ambiental, etc, ou seja, um uso puramente técnico. Indo além, os papéis nessa relação podem ser invertidos, onde o computador gera as possíveis soluções e o humano as avalia de acordo com seus critérios sensíveis. Esses diferentes níveis de pretensão foram sintetizados por Celani et al. (2007) na tabela (Imagem 13).

As limitações técnicas para essa evolução da relação ficaram nítidas para Mitchell, que em 1990 propõe *A New Agenda for Computer-Aided Architectural Design*, onde clama por uma revisão dos sistemas de desenho assistido por computador, identificando fenômenos como ambiguidade, descontinuidade, instabilidade e não monotonia como positivities para essa renovação em direção à exploração formal, indo além da simples representação e análise. Foi um chamado para a construção desses sistemas computacionais mais flexíveis e pluralísticos que iriam dar suporte à prática arquitetônica que culminou no fenômeno da *blob architecture*⁴³ (Imagem 14).

(2004) diz que a definição para problemas de design como mal-definidos foi apresentado por Herbert Simon, no livro *The Sciences of the Artificial* (1968). Os problemas mal-definidos apresentam dificuldade na busca por uma solução e muitas vezes soluções encontradas levam a outros problemas. Essas questões começaram a surgir apenas na segunda geração do Movimento dos Métodos em Projeto. Abordagens possíveis a esses problemas mal-definidos são tratadas por Mitchell (1975).

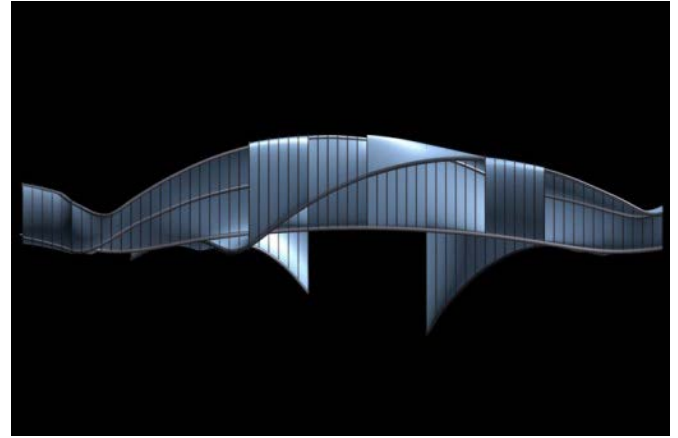
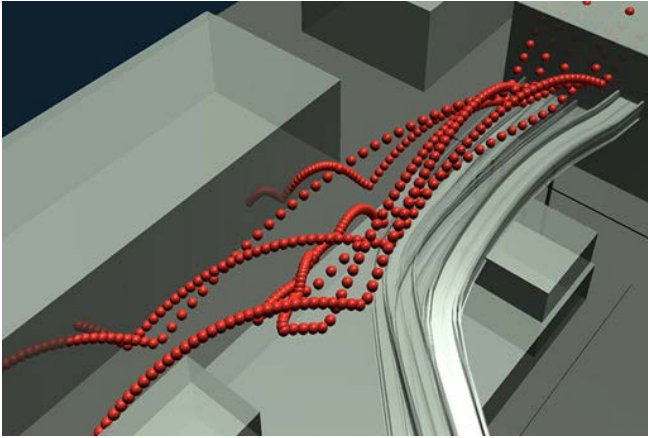
43 *Blob* está associado às polisuperfícies isomórficas da arquitetura digital. Trata-se de um acrônimo de *Binary Large Objects*. São superfícies topológicas definidas por um centro, uma área de superfície, uma massa relativa a outros objetos e um campo de influência. Os blobs tem essa capacidade de influir mutuamente entre si gerando formações compostas (LYNN, 1999, p.77-78). O termo foi cunhado por Greg Lynn em seu artigo *Blobs (or Why Tectonics is Square and Topology is Groovy)*. In: ANY 14, May 1996, pp 58–62. Carpo (2017, p. 4) associa o termo a um estilo, o estilo *blob*, ou estilo *spline*, ou estilo “*digital streamlining*”, que hoje associamos ao parametricismo. Segundo o autor, esse estilo marca a primeira era digital dos anos 90, que veremos a seguir em 2.2 Do digital ao computacional.



Imagem 14: The Water Pavilion, NOX, H2O Expo, 1993-1997. Fonte: Arcspace

“Ivan Sutherland’s idea of structured design representation in computer memory, the Galilean tradition of design validation by analysis for compliance with predefined criteria, and faith in stable, universal design rules, provided the foundation on which computer-aided architectural design was initially built. But we should not remain prisoners of these ideas. Close consideration of the phenomenology of design exploration and the epistemology of criticism suggests that we must embrace the possibilities of designs that have ambiguous and unstable structural descriptions, of constructive rule systems that are provisional, fluid, and mutable as we discover what they can produce, and of critical reasoning that is not bound by assumptions of monotonicity. These issues are not, I suggest, ones that arise under anomalous conditions that can safely be ignored in mainstream, ‘practical’ CAD systems. On the contrary, their centrality is characteristic of creative design processes.

I do not see the emergence of these complexities as cause for pessimism. The great achievement of pioneering work in CAD has been to construct a sufficiently rigorous and comprehensive theoretical framework to allow clear identification of these issues and appreciation of their importance. The challenge now is to build a new generation of CAD systems that responds to them in sophisticated ways. The language games that architects play are subtle, and require commensurately subtle instruments.” (MITCHELL, 1990a, p. 92)⁴⁴



A partir das novas ferramentas desenvolvidas na década de 90, vemos surgir projetos como, por exemplo, de Greg Lynn que desenvolve uma arquitetura animada⁴⁵ concebida dinamicamente. Através de uma força que causa movimento e inflexões particulares, a solução é um resultado possível da animação da forma. A forma é moldada pela interação entre o envelope e o contexto ativo, através de uma simulação (Imagens 15 e 16). Esses espaços animados emergem do campo cinético, de contextos informacionais e da interconectividade (ROHDE, 2017). Projetos com alto grau de complexidade começaram a emergir dando corpo à arquitetura digital, que passaram a ser chamados de projetos digitalmente mediados (*digitally mediated design*). No período que se seguiu, houve um aumento da capacidade performativa e de contextualização dos projetos por conta da crescente possibilidade de conectar os modelos digitais à sua materialização, indo do projeto para produção também digital através do CAM (*computer aided manufacturing*) (OXMAN, 2006).

Imagens 15 e 16: Port Authority Triple Bridge Gateway competition, Greg Lynn, 1994. Fonte: Greg Lynn

Nesse período prolixo de novas formas, o computador, muitas vezes, passou a ser usado como uma ferramenta multifuncional dentro de metodologias de design bem estabelecidas, o que Achim Menges

44 “A ideia de Ivan Sutherland de representação estruturada de design na memória do computador, a tradição galiléica de validação de design por análise para conformidade com critérios predefinidos e fé em regras de design universais estáveis forneceu as bases sobre as quais o projeto arquitetônico auxiliado por computador foi inicialmente construído. Mas não devemos permanecer prisioneiros dessas ideias. Uma análise cuidadosa da fenomenologia da exploração do design e da epistemologia da crítica sugere que devemos abraçar as possibilidades de projetos que têm descrições estruturais ambíguas e instáveis, sistemas construtivos de regras que são provisórios, fluidos e mutáveis à medida que descobrimos o que eles podem produzir, e de raciocínio crítico não limitado por suposições de monotonicidade. Estas questões não são, eu sugiro, aquelas que surgem sob condições anômalas que podem ser seguramente ignoradas em sistemas CAD “práticos” convencionais. Pelo contrário, sua centralidade é característica dos processos de design criativo.

Não vejo o surgimento dessas complexidades como causa de pessimismo. A grande conquista do trabalho pioneiro em CAD tem sido a construção de um arcabouço teórico suficientemente rigoroso e abrangente para permitir uma identificação clara dessas questões e a apreciação de sua importância. O desafio agora é construir uma nova geração de sistemas CAD que responda a elas de maneiras sofisticadas. Os jogos de linguagem que os arquitetos jogam são sutis e exigem instrumentos comensuradamente sutis.” Tradução da autora.

45 Diferente de movimento (*motion*) a arquitetura animada (*animation*) se refere à evolução da forma através de forças de atuação. Se refere à animismo, crescimento, atuação, vitalidade e virtualidade, o que abala as ideias de arquitetura estática (LYNN, 1999, p. 63).

(2010, p. 142), professor no Institute of Computational Design and Construction, em Stuttgart, associa a uma “complexidade artificial da geometria e da construção da arquitetura”. Para ele, era crucial para a disciplina cruzar os limites do desenho assistido por computador (CAD) em direção ao design computacional, se apropriando de todo o potencial da máquina. As mudanças resultantes desse avanço mudam paradigmas fundamentais de projeto ao computar um sistema recíproco entre material, forma e estrutura, levando a uma diferenciação morfológica e performativa, o que autor chama de “complexidade descomplicada”⁴⁶.

Essa diferença entre metodologias de projeto é mais uma vez retomada por Kostas Terzidis (2006, p. 57) que substitui o termo antes empregado por Negroponte, “*computer aided*”, por “*computation*”, já que existem diversos níveis em que o computador pode auxiliar em projeto. Para o autor de *Algorithmic Architecture*, a diferença básica entre computação (*computation*) e informatização (*computerization*) é que a primeira determina algo por métodos lógicos, calcula procedimentos levando a resultados, enquanto a segunda apenas processa e armazena informações inseridas. Computação aumenta a quantidade e a especificidade da informação para deduzir resultados, enquanto informatização associa valores dados, processa somente aquilo que foi inserido. Computação é sobre exploração do indeterminado, vago, e mal definido, enquanto informatização é sobre automação, mecanização e digitalização. Henriques et al. (2017) sintetizam as ideias de Terzidis na tabela a seguir⁴⁷ (Imagem 17).

Através dessa diferenciação chegamos ao ponto crucial dessa evolução. O computador tratado apenas como ferramenta torna-o um objeto de processamento de informação, o que Colletti (2013, p. 75) chega a afirmar ser uma postura irracional nos dias de hoje. Explorar o potencial computacional da máquina, para além do instrumental, nos leva a processos interativos, inter-relacionais entre homem e inteligência da máquina. Žižek (1996), filósofo e cientista social esloveno, diz que o computador é um terceiro novo estágio do esquema de Marx que vai da ideia de ferramenta como extensão do homem à ideia de máquina mecânica, que funciona automaticamente e impõe seu próprio ritmo ao homem. Segundo ele, o computador não funciona automaticamente, pois o homem impõe o ritmo, se aproximando então da ideia de ferramenta, mas que, no entanto, é de fato mais independentemente ativo do que a máquina, pois é capaz de diálogo. O computador atingiu o status de coautor no processo de design, ao estabelecermos diálogo com o computador, este possui autonomia

46 Ver as ideias de Gell-Mann, físico americano ganhador do Prêmio Nobel de 1969, ao criar o termo plética para conectar a simplicidade à complexidade, mais especificamente as regras simples que governam o universo e a resultante complexidade que se manifesta em diversidade, individualidade e evolução. GELL-MANN, Murray. *Let's call it pletics*. In: *Complexity*, v.1, n.5. Londres: John Wiley and Sons, 1995/96, p. 183. Disponível em: http://tuvalu.santafe.edu/~mgm/Site/Publications_files/MGM%20118.pdf

47 Os autores adotam o termo “computorização” para traduzir “*computerization*”.

Diferenças entre computorização e computação	
Computorização	Computação
Processo design	
Subjetivo, percepção	Redução racional
Informação qualitativa	Informação quantificável
Geometria representação	Geometria geração
Ferramentas	
Instrumental	Processual
Automação, repetição, mecanização	Processos generativos
Hierárquico, toda > parte	Emergente, parte > todo
Resultado	
Estilo individual, autor tangível	Autor difuso, indeterminado
Exploração ou invenção?	
Descobrir o existente	Criar o novo, artificial

para levantar questões, ter voz ativa dentro do processo. E isso fica ainda mais nítido quando os sistemas computacionais de produção adquirem a capacidade de sentir, agir e reagir como veremos através da fabricação robótica (MENGES, 2015b, p. 29).

Diante da profusão de informações e diferentes aplicações da tecnologia, há muito desentendimento sobre essa diferenciação, gerando muitas críticas errôneas. Para fugir dessa confusão, Terzidis apresenta uma outra opção, o design algorítmico, que deixa nítida a diferença entre a manipulação de superfícies utilizando o mouse⁴⁸ e a programação algorítmica em diálogo com o computador. Esta questão, sobre como os arquitetos entram na caixa preta para estabelecer diálogos com a máquina, será abordada na seção 2.3, mas antes vamos ao pensamento teórico desenvolvido nesse tempo. Mesmo que nos primórdios da computação já houvesse a preocupação com o uso inteligente da máquina, ela certamente foi utilizada com uma mentalidade antiga, otimizando processos existentes. O mesmo se deu sobre o pensamento, onde primeiro o digital tentou ser enquadrado dentro do panorama crítico pós-moderno, para posteriormente romper limites e criar novos paradigmas sem precedentes. Veremos a seguir esse pensamento partir do digital rumo ao resgate do computacional.

Imagem 17: Diferenças entre computorização e computação. Fonte: HENRIQUES et al., 2017

48 Terzidis (2013, p.58) afirma que “o conceito matemático e implementação de software de NURBS como superfícies é um produto de computação numérica aplicada, no entanto, o rearranjo de seus pontos de controle através de *software* comercial é simplesmente uma transformação afim, uma translação.” Tradução da autora.

2.2 Do digital ao computacional

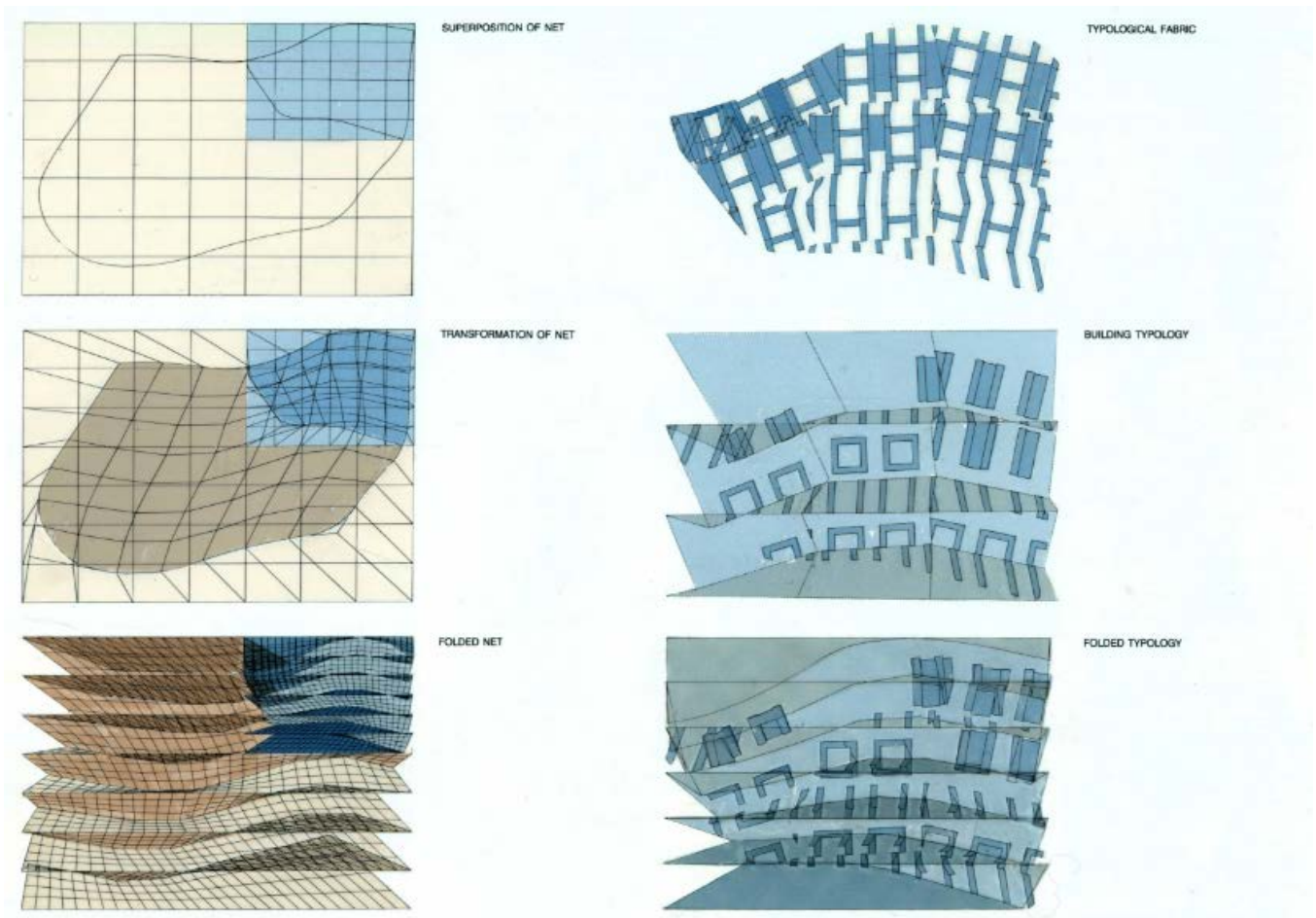
“Não estamos falando do pensamento instrumental, mas da própria matéria de nossa sociedade.” (LATOURE, 1994, p.9)

Pode-se dizer que passamos por algumas revoluções tecnológicas, mas também por uma profunda transformação cultural, enquanto a teoria ainda caminha para entender tudo o que aconteceu, e acontece a velocidades cada vez maiores. As bases da teoria da arquitetura digital que floresceram no início do novo milênio foram alimentadas desde então por muitos novos conceitos e paradigmas alinhados com o desenvolvimento tecnológico. A partir da segunda década do milênio vemos um novo período de transformação das teorias digitais, as quais passam por uma “renegociação das suas interrelações discursivas”, e podemos apontar o design morfogenético na crista da teoria digital do momento (OXMAN e OXMAN, 2014, p. 8 e 11). Tentaremos aqui mostrar este panorama do pensamento digital e seus paradigmas através de seus principais pensadores e críticos. Diante da diversidade de vertentes do pensamento digital e das possibilidades tecnológicas, de faz necessário começar por uma arqueologia⁴⁹ dos termos e posturas assumidas pelos arquitetos digitais ao longo desse processo de assimilação de novas técnicas de projeto e produção de arquiteturas. Antoine Picon (2009), professor em Harvard, chama atenção para o emprego do termo arquitetura digital, que não deve se estender a toda e qualquer arquitetura feita com o auxílio do computador. Para o autor, o digital vai além do uso da máquina como ferramenta de desenho, e está associada a uma dimensão experimental, e por isso, arquitetura digital é aquela que não poderia ser concebida de outra forma que não através da tecnologia.

Com os avanços técnicos, e a importação de tecnologias de fabricação empregadas em outras áreas da ciência e da indústria, a arquitetura digital presa ao ciberespaço⁵⁰, pôde finalmente emergir ao mundo físico, ganhando materialidade. Esse recente encontro do mundo virtual com o mundo físico tem grandes consequências para além da arquitetura, impactando nosso modo de pensar, atuar e nos relacionar com o mundo pós-humano. O momento em que nos encontramos, e o espaço ciber-físico que ocupamos serão analisados em

49 Em alusão à *Archaeology of the Digital* (2014), exposição que virou livro, onde Greg Lynn faz um apanhado de projetos dos anos 80 e 90, não com a intenção de escrever a história da arquitetura digital, mas de analisar projetos experimentais do início da era digital tentando extrair sua essência, a verdadeira raiz da atualidade. <https://www.cca.qc.ca/en/events/3333/archaeology-of-the-digital>

50 Ciberespaço é um termo criado em 1984 pelo escritor norte-americano de ficção científica William Gibson em seu livro *Neuromance*. Refere-se ao o espaço não físico constituído pelas redes digitais, nas quais circulam todo tipo de informação. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ena%C3%A7%C3%A3o>



seguida, na seção 2.3 Como computar?. Aqui nos interessa justamente caminhar do digital ao computacional, identificando seus pontos de inflexão, para entender que a transformação mais profunda desse processo se dá justamente na mente humana, na nossa visão de mundo através da tecnologia.

Imagem 18: Rebstockpark Master Plan, Peter Eisenman, Frankfurt, 1990-91. Diagramas conceituais. Fonte: Peter Eisenman

O casal Oxman, professores da Technion – Israel Institute of Technology, em seu livro *Theories of the Digital in Architecture* (2014) faz um apanhado de textos significativos na tentativa de mapear os discursos, identificar transformações e traçar a epistemologia das teorias digitais até aquele momento. Parametricismo, performance, morfogênese, tectônica, materialidade, interatividade, complexidade e evolução são alguns dos temas em voga. A partir deles, postulam os novos conjuntos paradigmáticos que definem e explicam modelos emergentes e métodos de design, identificando duas fases de consolidação do discurso teórico baseado no digital.

Na primeira aproximação computacional da arquitetura predominou a abordagem metodológica do pensamento digital, centrada em análises e modelagem formal baseada em comportamento, processo e cognição (OXMAN, 2006, p. 230), tendo o livro de Mitchell (1990b) como grande exemplo dessa abordagem. A partir da década de 90 as tecnologias integradas ao processo de design começam a mudar, gerando uma mudança também na abordagem da arquitetura-



Imagem 19: Yokohama International Port Terminal, Foreign Office Architects, Japão, 1995–2002. Fonte: Archdaily

ra digital, dando origem ao que se configura a primeira fase de uma teoria digital. Esse período, final do século XX e início do XXI, foi de grande produção teórica e consolidação conceitual sobre o digital, tendo como marco a edição especial da *Architectural Design* de 1993 editada por Greg Lynn, *Folding*⁵¹ in *Architecture*. A edição conta com textos e projetos de Peter Eisenman, John Rajchman, Bahram Shirdel e Frank Gehry, entre outros, e foi catalisadora dessas novas ideias, mesmo que os projetos apresentados nela ainda não representassem a curvilinearidade defendida pelo folding (Imagem 18). Seu climax se dá apenas ao fim do milênio, quando então o *folding* evolui para o topológico (Imagem 19) (CARPO, 2004, p. 35).

O modo de se relacionar com os conceitos teóricos nesse momento ainda estava totalmente conectada com o discurso formalista pós-moderno, sendo o *folding* uma contraposição ao desconstrutivismo, uma substituição da fratura pela dobra. Essa primeira fase do discurso teórico digital busca a definição dessa nova arquitetura pautada por conceitos da filosofia e da matemática, atingindo seu auge em 2003-2004 (OXMAN e OXMAN, 2014, p. 12). As novas possibilidades formais do design digital, caracterizadas pelas curvas fluidas do *folding*, configuram a marca da época, o início da maleabilidade do digital, associada ao “estilo *spline*” (Imagem 20) (CARPO, 2017, p. 4). Aqui identificamos o primeiro deslumbramento formalista do percurso, período em que as formas digitais predominaram no imaginário e no discurso dos arquitetos, que se encantaram diante dos *blobs* (*binary large objects*).

51 O termo *folding* foi extraído por Peter Eisenman do livro de Gilles Deleuze, *The Fold, Leibniz and the Baroque* (1988) sobre o conceito matemático de dobradura e a teoria da catástrofe da matemática. A leitura que fez desse conceito enfatizou a noção de metamorfose, mudança e movimento das formas (CARPO, 2004, p. 37).



Um novo corpo teórico se desenvolveu com os avanços tecnológicos, que para além das ferramentas de design, passaram a fazer parte também da produção da arquitetura com as máquinas de controle numérico incorporadas ao ofício. Essa segunda geração de consolidação do discurso teórico digital trata do design paramétrico, fabricação digital, integração material e processo de design biomiméticos e integrativos, ou seja, é bem amplo, extrapolando as limitações de um discurso formalista. Assim, vemos o encanto pela manipulação formal e complexidade compositiva dar lugar a novas explorações processuais do digital. A partir de uma tomada de consciência do poder das ferramentas em constante evolução, o discurso começa a se mover em uma direção mais tecno-científica, caminhando rumo ao computacional. A diferenciação do design passou ser a contribuição mais importante do design digital cunhada sob o termo *Non-Standard Architectures*⁵², a partir da exposição organizada por Frédéric Migayrou no Centre Pompidou em 2003 (OXMAN e OXMAN, 2014). Foi dentro desse panorama diverso de abordagens e processos metodológicos que Rivka Oxman escreveu o artigo *Theory and Design in the First Digital Age* (2006), na tentativa de estabelecer as relações entre teoria e prática na primeira era digital⁵³. Seu título faz explícita referência ao consagrado *Theory and Design in the First Machine Age* (1960) de Reyner Banham, no qual o autor aborda reflexo das principais transformações da ciência e da tecnologia identificáveis na produção arquitetônica na década de 50, final da Segunda Revolução Industrial. Sua importância há época foi imensa ao jogar luz sobre os avanços tecnológicos, pois são “essas transformações que afetam poderosamente a vida humana e abrem novas possibilidades de escolha na ordenação de nosso des-

Imagem 20: Lewis Residence, Frank O. Gehry & Associates, 1989–1995. Frame geométrico do modelo em Catia 3D. Fonte: Yale News

52 Carpo (2017, p. 180) afirma que o termo *non-standard* é equivalente à customização em massa (*mass customization*) que se refere à produção em massa (*mass production*) de elementos variados com custos equivalentes à uma produção padronizada (*standardized*).

53 A primeira era digital, segundo Gramazio e Kohler, trata das formas na virtualidade e dos processos digitais. Na segunda era digital, o virtual se torna concreto e tangível através da materialização digital, com enfoque no robô. Através dele, programação computacional das formas e sua construção são condicionantes uns sobre os outros (GRAMAZIO e KOHLER, 2014, p.9).

tino coletivo.” (p. 11). Para escolher esse destino, é preciso conhecer as possibilidades da atualidade, acrescentando ao caldo uma mente visionária que intui onde é possível chegar. Dito isso, Rivka identifica os modelos paradigmáticos da arquitetura digital ao final da Terceira Revolução Industrial, uma era marcada pela automação de processos através do computador, em que os arquitetos começam a extrapolar a ideia do padronizado em direção ao diferenciado (*non-standard*).

Para formular a estrutura conceitual e os modelos teóricos do design digital, Rivka recorre à análise dos processos de design desenvolvidos até aquele momento, estruturando-os em uma série de modelos metodológicos que de certa forma definem e explicam paradigmas inovadores do design digital. Pontuaremos aqui estes processos, a título de esclarecimento desse panorama no início do século, mas não nos deteremos a fundo em sua explicação, pois não há espaço para tal. Nosso objetivo é chegar ao pensamento atual que deriva da evolução desses processos. Esses modelos são:

1 CAD: O objeto possui uma estrutura geométrica definida a priori, transcrita para o computador, e por isso são modelos descritivos;

2 Formativos: Permitem o controle topológico e geométrico da forma possibilitando uma geração variável. As estruturas relacionais são geometricamente definidas, mas a forma não, emergindo da variação dessas relações, em um processo de formação. Este pode se basear na topologia, em parâmetros associativos e na dinâmica da animação da forma baseada no tempo;

3 Generativos: São mecanismos computacionais aplicados a processos generativos da forma, onde o arquiteto interage com o mecanismo através de regras, relações e princípios, guiando a seleção de soluções desejáveis. Essa interação pode ser feita através de uma gramática da forma⁵⁴ onde expressões matemáticas são usadas como regras de transformação ou modelos evolucionários que se baseiam em modelos evolutivos da natureza.

4 Performativos: Processos dirigidos a uma performance ou comportamento desejados, que pode se dar através de processos formativos ou generativos. Prescinde simulação.

5 Composto integrado: São processos integrativos que incluem formação, geração, avaliação e performance, que passam a

54 “Gramática da forma (em inglês *shape grammar*): sistema de produção baseado na gramática generativa de Noam Chomsky, que utiliza formas bidimensionais ou tridimensionais no lugar de palavras. Uma gramática da forma é definida a partir de um vocabulário básico de formas, um conjunto de regras de transformação dessas formas, e uma forma inicial, à qual as regras são aplicadas recursivamente, até que se chegue à forma desejada. A esse processo dá-se o nome de derivação. O sistema, que foi criado pelos pesquisadores americanos George Stiny e James Gips na década de 1970, tem sido aplicado à análise e à síntese de obras de arte e de arquitetura. Para maiores informações, ver <http://www.shapegrammar.org/>.” (CELANI, 2008, p. 283).



Imagem 21: BMW Pavilion, Bernhard Franken, Munique, 1999. Fonte: Franken Architekten

compartilhar a mesma mídia digital de design. Por isso, provém um fluxo de informação em múltiplas direções. Uma rede composta integrada permite novos meios de design, ainda pouco desenvolvidos há época, mas com grande potencial paradigmático.

Nessa época, paralelamente ao desenvolvimento desses novos métodos de design, os avanços técnicos da manufatura permitiram a tão esperada integração entre design e produção na arquitetura. Branko Kolarevic, professor na Universidade de Calgary, Canadá, teve grande influência nesse período, em seu livro *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing* (2005), convida uma série de atores e pensadores a apresentar a relevância da fabricação do digital, suas aplicações e direcionamentos. Para ele, esse período trouxe credibilidade construtiva ao design de vanguarda que estava sendo produzido até então, e se encontrava limitado ao meio virtual (2001, p. 120). Percebe-se que não são as novas possibilidades formais de alta complexidade que possuem maior relevância no campo digital, mas a possibilidade de gerar informação construtiva diretamente da informação de projeto, através de novos processos e técnicas de design e fabricação (*file to factory*), permitindo algo inédito na produção maquinica, a diferenciação de componentes (Imagem 21). Por se tratar de geometrias digitais descritas em NURBS sua computação para fabricação diferenciada é perfeitamente possível através de dispositivos computacionais de controle numérico, CNC⁵⁵ (KOLAREVIC, 2001). Trata-se do início desse reencontro entre arquitetura, engenharia e construção através de processos digitais colaborativos. Kolarevic (2005, p. 123) associa esse novo papel do arquiteto a um “mestre construtor informacional”, comparável aos mestres do passado medieval, que não apenas criavam, mas eram responsáveis pela construção de suas obras.

55 Dispositivos CNC (*Computer Numeric Control*) diversos são utilizados há mais de 40 anos. Trata-se de um prefixo para diversos tipos de máquinas que usam um sistema computacional para gerar instruções codificadas que controlam os movimentos da máquina. Essas máquinas de fresagem e roteamento (*milling and routing*) podem cortar objetos e superfícies 3D a partir de um arquivo CAD, através de 3 ou mais eixos. (DUNN, 2012, p.96 e 186).



Imagem 22: The Sequential Wall, Gramazio Kohler Research, ETH Zurich, 2008. Fonte: Gramazio Kohler Research

Esse novo empoderamento do arquiteto gera o segundo deslumbre que identificamos nessa trajetória, o encantamento pelas máquinas de fabricação. O século XX já havia celebrado o instrumentalismo maquínico (COLLETTI, 2013, p. 86), mas tão profundas eram as soluções que buscavam através da máquina, que os novos problemas criados foram de igual dimensão. Talvez por isso os arquitetos digitais celebraram as máquinas de fabricação digital circunscrevendo nelas apenas questões de projeto. Nesse período, grande parte da produção teórica digital aborda processos de integração entre design e fabricação, através de processos de corte, aditivos, subtrativos e formativos⁵⁶. Aqui, no entanto, ainda há grande limitação no direcionamento do fluxo da informação digital, em um processo hierarquizado, onde primeiro se produz o design e depois o fabrica digitalmente. É nesse início de século XXI que se tem a tomada de consciência da importância da informação dentro da produção, comunicação, aplicação e controle do processo construtivo, o início de uma integração entre design, análise, manufatura e construção da arquitetura, que será desenvolvida na prática a partir daí, através de modelos compostos integrados de projeto.

Se antes havia uma lacuna entre o projeto digital e a tectônica tradicional, as ferramentas de fabricação digital surgiram para realizar essa conexão, e se muitos dos críticos do digital supunham a desmaterialização da arquitetura, percebe-se o potencial do computador em criar uma nova materialidade. Não são apenas os processos, mas o conteúdo também em transformação, produzindo novas experiências inteiramente novas em direção a uma nova compreensão da disciplina. O discurso passa a ser pautado por questões materiais e tectônicas, por críticos como Antoine Picon e Manuel DeLanda, como também a embasar a prática dos pioneiros da pesquisa com fabricação robótica, Gramazio Kohler Research, iniciada em 2005.

⁵⁶ São processos digitais análogos à produção tradicional, que passam a ser controlados por informações digitais precisas. Para esclarecimento sobre esses processos e máquinas, ver o didático *Digital Fabrication in Architecture*, de Nick Dunn, 2012 e KOLAREVIC, 2005.

A dupla de pesquisadores de Zurique adotou o termo ‘materialidade digital’ para descrever a transformação da expressão da arquitetura causada pelo digital. Essa materialidade digital nasce da integração de processos construtivos na fase de design, possível através da programação (Imagem 22). Essa transformação da materialidade da arquitetura vai do design de formas estáticas para o design de processos materiais. Estes novos processos estão diretamente ligados a uma nova maneira de pensar arquitetura, através de parâmetros, condições e relações dinâmicas, que por isso, possuem certo grau de liberdade ao fazer emergir o design. Passa a fazer parte também do processo de design, a criação do processo de fabricação, pois ao usar máquinas genéricas como o robô, os arquitetos começam a transformar e personalizar suas ferramentas de produção, “ensinando” ao robô a sua maneira de conectar “o mundo da lógica imaterial com o da construção material” (GRAMAZIO e KOHLER, 2008a, p. 9). Se antes nos aproximamos dos mestres construtores do período medieval, agora avançamos em complexidade em direção aos mestres construtores da renascença, que para tornar possível seu projeto imaginado, tinham também que formular os meios inéditos para sua execução⁵⁷. O arquiteto passa a ser também produtor de tecnologia ao formular processos de design que precisam expandir os meios de produção para realização do design, e para isso se associam a arquitetos de software e de robótica para construir seus sistemas.

O paradigma da forma dá lugar ao paradigma do material, e se de início vemos essa descrição da materialidade de forma prática, direcionada aos processos de materialização, começam a surgir relações entre o mundo digital e a esfera tectônica, dando nascimento ao paradigma da tectônica digital⁵⁸. Vale lembrar que a tectônica não trata apenas da construção, mas de todos os aspectos materiais, construtivos, estéticos e culturais que contribuem para o potencial expressivo da arquitetura. Segundo o casal Oxman (2014, p. 222), a tectônica digital é tanto continuação da tectônica moderna baseada na poética espacial/estrutural, como a construção de uma nova poética material/estrutural. Rivka vai mais a fundo na questão mapeando a capacidade informacional do digital em integrar, mediar e diferenciar conteúdos tectônicos, identificando as transformações do sentido da tectônica através das possibilidades computacionais. Segundo a autora, existem diferentes abordagens à tectônica digital, e muitas definições propostas, sendo a morfogênese⁵⁹ uma dessas abordagens (OXMAN e OXMAN, 2014, p. 227-250).

57 Como os desafios inéditos encontrados por Filippo Brunelleschi na construção da cúpula da Catedral de Santa Maria Del Fiore em Florença, Itália, 1434. Ver ROSS, King. O Domo de Brunelleschi. Rio de Janeiro: Editora Record, 2013.

58 Ver LEACH, N.; TURNBULL, D.; WILLIAMS, C. J. K.(eds.). *Digital Tecntonics*. Chichester: Wiley Academy Press, 2004.; e SPUYBROEK, Lars. *Textile Tectonics*. Rotterdam: NAI Publishers, 2011.

59 A autora descreve morfogênese como “definidora da relação entre conceitos tectônicos materiais em processos de *form-finding* e na natureza.” (OXMAN e OXMAN, 2014, p.233).

Picon (2009, p. 52) conecta as novas possibilidades formais do digital ao estilo barroco⁶⁰ e ressalta a tectônica digital a partir de um novo tipo de ornamento⁶¹ (Imagem 23). Para o autor, o ornamento visto a partir de um viés estrutural dentro do design digital revela valores sociais, hierarquias e ordens subjacentes que nos informa sobre a cultura digital contemporânea, por isso, sempre opta por uma visão mais panorâmica, mais questionadora e menos afirmativa ao abordar o digital. Para ele, não se trata de uma mera evolução, mas as transformações pelas quais estamos passando representam uma revolução no campo prático e teórico, e por isso, precisam ser questionadas (PICON, 2010, p. 25). Picon estimula o pensamento digital para além do domínio do design, do objeto e do processo, trazendo questões que ultrapassam o campo da arquitetura em direção ao pós-humano e ao mundo que criamos. Para ele não cabe mais sermos indiferentes às amplas questões levantadas por nossas criações, e talvez aqui resida o ponto fraco do digital na arquitetura, nascer sem uma agenda sociopolítica definida, sem compromisso com tamanho potencial de impacto (PICON, 2004, p. 120).

“A number of problems remain however to be addressed. Despite the fact that what is happening today is rooted in a much longer history of the relations between architecture and an information-based society, a history that really begins at the dawn of the twentieth century, digital architecture tends to be oblivious to the historical dimension, to position itself implicitly in an everlasting present. This lack of historical perspective goes with a certain disinterest for the political implications of design. The time has perhaps come to address these shortcomings frontally. This might require the reinvention, or rather reinterpretation of some of the fundamentals of architecture, beginning with the need to shelter from the elements, let those be physical or digital. What could be the primitive hut of the digital age?” (PICON, 2010, p. 25)⁶²

Outro pensador importante das questões materiais da arquitetura digital é Manuel DeLanda, artista e filósofo, professor na Graduate Architecture and Urban Design, no Pratt Institute, Nova Iorque.

60 Sugerida a partir da leitura de Gilles Deleuze, *The Fold, Leibniz and the Baroque* (1988).

61 Ver PICON, A. (ed.). *Ornament: The Politics of Architecture and Subjectivity*. Londres: John Wiley & Sons, 2013.

62 “Vários problemas ainda precisam, porém, ser abordados. Apesar do fato de que está acontecendo hoje estar enraizado em uma história muito mais longa das relações entre arquitetura e uma sociedade informacional, uma história que realmente começa no alvorecer do século XX, a arquitetura digital tende a ignorar a dimensão histórica, a se posicionar implicitamente em um presente eterno. Essa falta de perspectiva histórica acompanha um certo desinteresse pelas implicações políticas do design. Talvez tenha chegado a hora de abordar essas deficiências de frente. Isso pode exigir a reinvenção, ou melhor, a reinterpretação de alguns dos fundamentos da arquitetura, começando com a necessidade de se proteger dos elementos, sejam eles físicos ou digitais. Qual poderia ser a cabana primitiva da era digital?” Tradução da autora.



DeLanda defende um novo materialismo, derivado das ideias de Gilles Deleuze (a sempre influenciar o pensamento arquitetônico) e atualizado a partir das novas concepções do mundo material tecnológico. O embasamento desse discurso parte da ideia de que nenhum objeto é puramente atual, mas contém uma série de imagens virtuais, com potencial para se atualizarem, dependendo apenas de um catalisador para tal (DeLANDA, 2015). Esse olhar sob a matéria a torna cúmplice no processo de design, onde designer e material atuam em conjunto no processo de definição da forma. DeLanda deixa clara a distinção entre propriedades e capacidades materiais, onde as propriedades se encontram sempre atuais, manifestas, mas suas capacidades são virtuais uma vez que se encontram latentes. As capacidades do material são relacionais, dependem de “outro” para se tornarem reais. Se a causalidade agora é percebida como não-linear e a matéria possui uma estrutura de espaço de possibilidades, onde suas capacidades virtuais se encontram, ela mesma passa a ser identificada à uma força morfo-genética própria. A matéria passa a ser ativa dentro do processo de design.

Imagem 23: Algae-Cellunoi, marcosand-marjan, Guan Lee e Richard Beckett, instalação para a exposição ARCHILAB 2013 – Naturalizing Architecture, FRAC Centre, França, 2013. Fonte: Marjan Colletti.

Essa concepção da matéria ativa ressoa no trabalho de Achim Menges, que desde 2004 escreve sobre a emergência da forma a partir de processos morfo-genéticos. Através da exploração das propriedades, características e comportamento dos materiais, sua microescala compositiva e a macroescala do sistema, é possível ver emergir sistemas de capacidades morfo-genéticas performativas (MENGES, 2012b). De fato, o autor usa o conceito de espaço de possibilidades adotando o termo da biologia, o espaço formal, ou espaço morfológico onde estão descritos e relacionados os fenótipos orgânicos (MITTEROECKER, 2009). Aplicado ao design, esse espaço morfológico abriga as possibilidades do material e da máquina, bem como os requerimentos de design atribuídos, onde as soluções possíveis do design devem estar contidas (Imagem 24). Esse modo de abordar o processo de design é definido

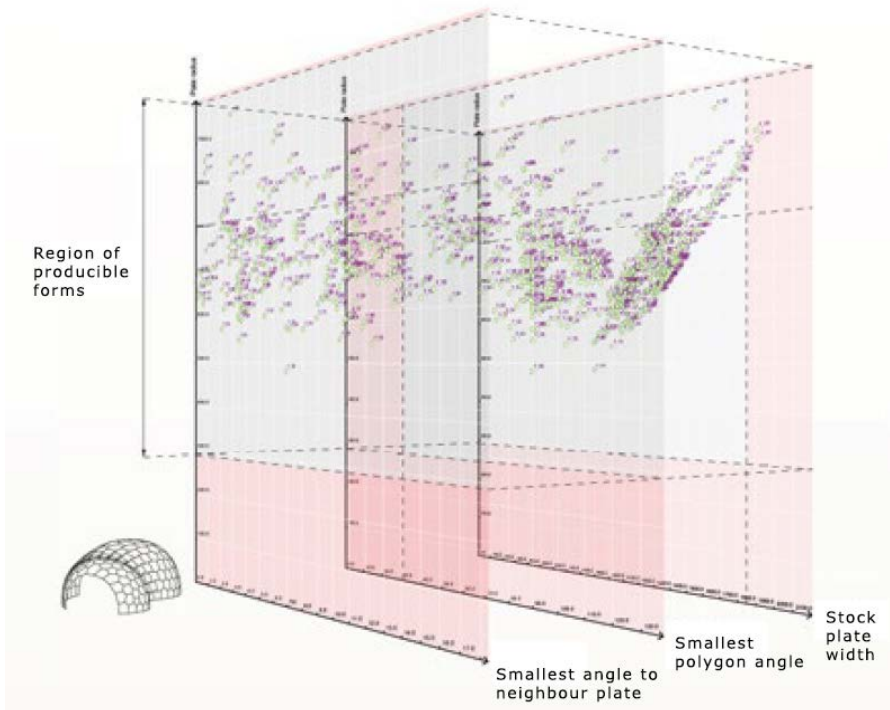
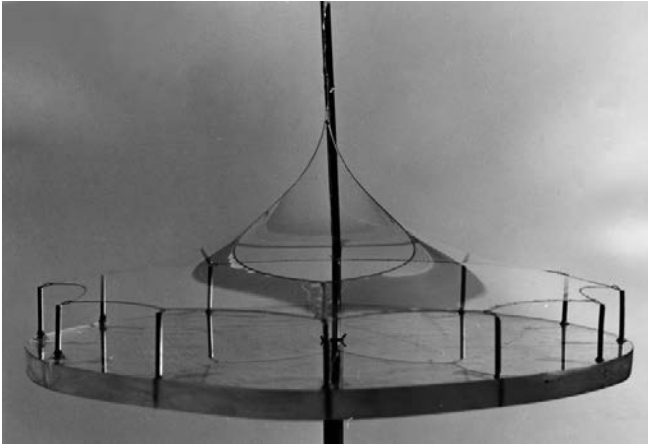


Imagem 24: Espaço morfológico da máquina n-dimensional e sua região de formas produzíveis. Fonte: MENGES, 2015a, p.95.

por Terzidis (2006, p. 42) como processo de resolução de problemas (*problem-solving process*). Se para cada problema existe um espaço de soluções, um domínio que contém todas as possíveis soluções, esse processo busca soluções alternativas que atendam certos objetivos estabelecidos, e por isso podem ser consideradas estados de soluções. Nele o design é abordado de maneira sistemática, finita e racional, na investigação de possíveis soluções ao problema, que podem ser desconhecidas de antemão, e podem até mesmo levar a desvios dos objetivos originais. Os problemas de design passam a ser endereçados não apenas de forma determinística, mas de forma probabilística.

A partir desses processos, a materialidade se torna direcionadora do design em um nível muito mais profundo, acessando aspectos do material que vão desde sua micro-estrutura interna ao comportamento responsivo às condições ambientais e à otimização formal. Segundo Menges (2015a, p. 10), essa nova concepção do design direcionado pela matéria tem seus precedentes em experimentos acadêmicos de Josef Albers e Frei Otto, através de duas abordagens. O primeiro, ainda na década de 20, identifica o comportamento material para usá-lo como fonte criativa no desenvolvimento de novos modos de pensar e construir, ao invés de impor conhecimentos estabelecidos da profissão sobre a matéria. Seu processo é aberto (*open-ended*) e extremamente experimental ao dar força criativa ao material. O segundo, durante a década de 60, explora a capacidade inerente dos materiais de computar a forma em busca de um equilíbrio estático, mesclando forças externas e o comportamento material dentro de um sistema, através de simulações em modelos físicos. Frei Otto causa um grande impacto no pensamento computacional (futuramente) ao inaugurar o



procedimento que intitula de *form-finding*, a troca ativa entre designer, estrutura e material através da exploração de suas capacidades virtuais inerentes manifestas sob determinadas condições.

Frei Otto se consagrou pelos avanços em estruturas leves tensionadas e membranas, que começaram justamente com modelos em bolha de sabão, capazes de gerar superfícies mínimas (Imagem 25). A partir da determinação de pontos fixos, o material é capaz de computar uma geometria otimizada para determinada condição de borda e de forças. Um dos primeiros exemplos desse processo aplicado ao design se refere ao projeto do Pavilhão Alemão na Feira Mundial de 1967 no Canadá⁶³. Seu processo de design evoluiu para simulação através de modelos físicos complexos, com cargas aplicadas e dispositivos para medição das deformações da malha (Imagem 26). Hoje em dia, ao empoderarmos esses processos heurísticos com a capacidade computacional do digital, sua materialização deixa de ser a execução física de uma ideia para adquirir capacidades generativas de design, através de iterações quase infinitas na descoberta da forma (CARPO, 2017). Estamos diante do início de uma grande mudança na qual essas novas relações entre designer e material mudam nossa própria cultura material, expressa através de nossos novos artefatos inventados (MENGES, 2015a, p. 15).

Imagem 25: Modelo em bolha de sabão, Frei Otto, 1967. Fonte: Atelier Frei Otto Warmbronn.

Imagem 26: Modelo para cálculo das forças atuantes na malha de cabos, Pavilhão Alemão da Feira Mundial de Montreal, 1967. Frei Otto, Rolf Gutbrod e Fritz Leonhardt. Fonte: Atelier Frei Otto Warmbronn.

“In this process of heuristic (not mathematical) optimization, every simulated model that was tried and discarded corresponded to a physical model that a traditional artisan would have made, tested, and likely broken in real life. Using digital simulations of structural performance, however, today we can make and brake on the screen in a few hours more full-size trials than a traditional craftsman would have made and broken in a lifetime.” (CARPO, 2017, p. 40)⁶⁴

63 <https://www.archdaily.com.br/br/794650/classicos-da-arquitetura-pavilhao-ale-mao-da-expo-67-frei-otto-e-rolf-gutbrod>

64 “Nesse processo de otimização heurística (não matemática), todo modelo simulado que foi experimentado e descartado correspondia a um modelo físico que um artesão tradicional teria feito, testado e provavelmente quebrado na vida real. Usando simulações digitais de desempenho estrutural, no entanto, hoje podemos fazer e quebrar na tela em algumas horas mais testes em tamanho real do que um artesão tradicional teria feito e quebrado em uma vida inteira.” Tradução da autora.

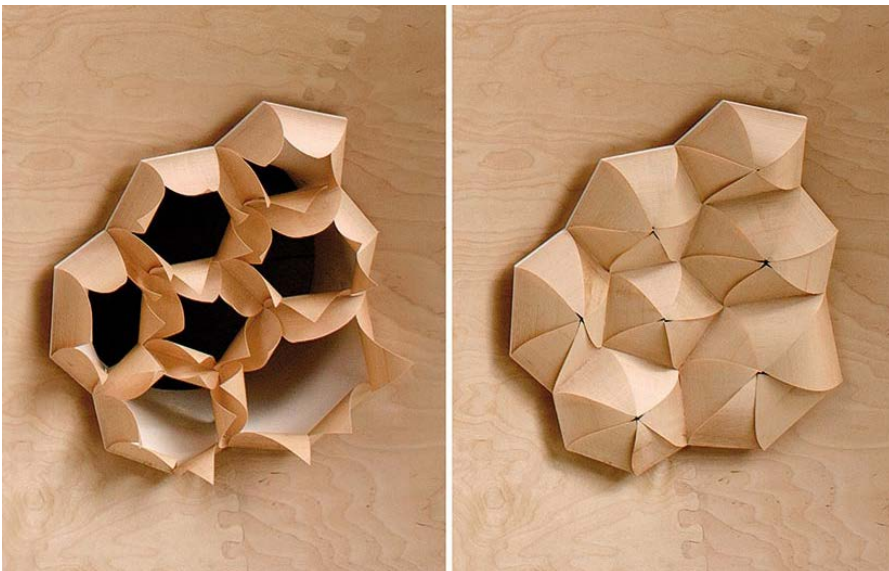


Imagem 27: Jean Nouvel, Instituto do Mundo Árabe, Paris, 1989. Fonte: Archdaily.

Imagem 28: Abertura adaptativa do Pavilhão HygroSkin: aberto sob baixa umidade, e fechado sob alta unidade relativa do ar. Fonte: ICD

A respeito dessa vertente do pensamento digital que considera o material ativo, Kolarevik (2015) alerta para uma falsa atualização permitida pela programação e lança seus dados apostando no futuro desenvolvimento de uma arquitetura adaptativa, que se utiliza de materiais que estão aqui, já em uso, mas que contém um potencial ainda não explorado, ainda não ‘atualizado’ na construção. Essa nova arquitetura adaptativa vem para substituir os modelos baseados em atuadores mecânicos, como os usados no Instituto do Mundo Árabe de Jean Nouvel, ainda em 1989 (Imagem 27). Agora, a resposta do material não é ativada por mecanismos, mas está mesmo dentro do material, que responde a estímulos do ambiente. Os materiais se tornam programáveis através da exploração de suas capacidades inerentes. Passa a ocorrer uma enação⁶⁵ dessas capacidades, ao invés de serem externa-

65 Termo cunhado pelos biólogos chilenos Francisco Varela e Humberto Maturana, sobre uma ação que vem de dentro para fora, e que estabelece relação decisiva com o meio. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ena%C3%A7%C3%A3o>



mente impostas. Esta enação pode ser vista nos trabalhos de Menges, como HygroScope e HygroSkin (Imagem 28), onde as capacidades higroscópicas da madeira são exploradas. Para Menges, a madeira ganha outra dimensão ao incorporar tecnologias computacionais, e dedica um livro a experimentos conduzidos na exploração dos limites do material, *Advancing Wood Architecture* (2017a). Tal importância dada à madeira neste momento se deve não só a suas capacidades inerentes passíveis de serem ativadas, e à cultura e história incorporadas que podem ser reinterpretadas através do computacional, mas principalmente, por suas virtudes ecológicas que se tornam fundamentais para o futuro da construção (MENGES et al., 2017a, p.1-9).

Para Neri Oxman, professora e pesquisadora no MIT Media Lab, onde coordena o grupo de pesquisa Mediated Matter, ecologia é a questão chave na abordagem material do design. Ao defender uma Ecologia Material (*Material Ecology*), Neri desenvolve uma

Imagem 29: Carpal Skin, Neri Oxman, 2009-2010. Tala de punho em compósitos acrílicos, uma luva protetora para a Síndrome do Túnel do Carpo. Fonte: Neri Oxman.

Imagem 30: Minotaur Head with Lamella, Neri Oxman, 2012. Capacete protetor absorvente de choque capaz de flexionar e deformar. Fonte: Neri Oxman.

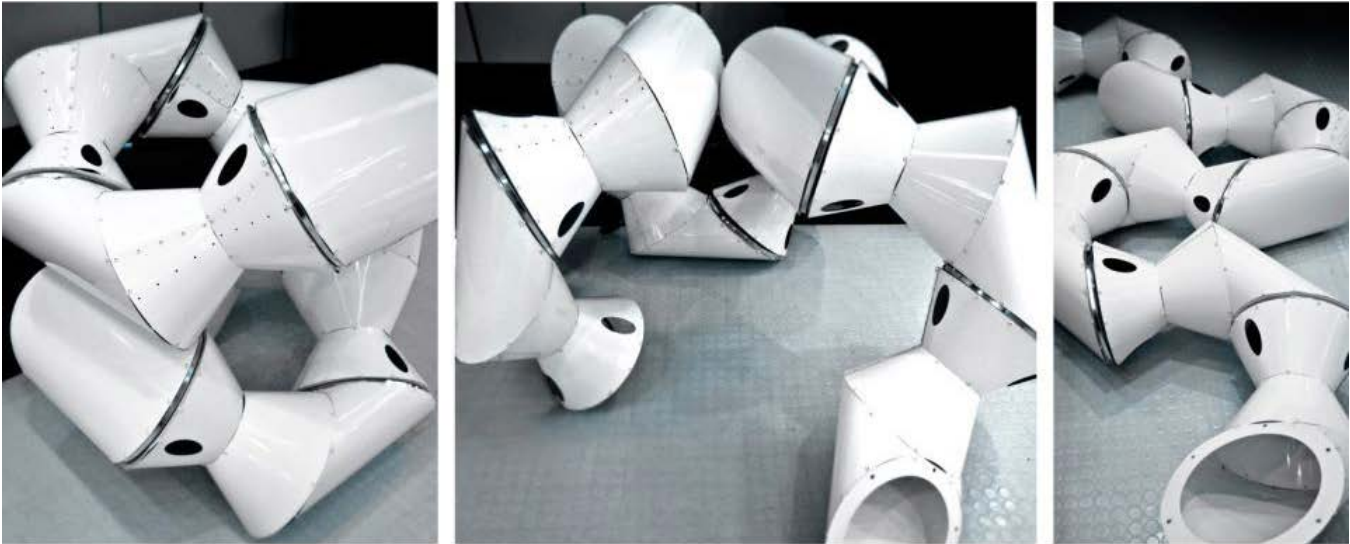


Imagem 31: Logic Matter, Skylar Tibbits, 2011. Sistema de módulos de lógica digital mecânica passiva para montagem autoguiada de estruturas de larga escala. Fonte: Self Assembly Lab.

nova expressão formal baseada na troca informacional entre matéria, fabricação e ambiente. Essa ecologia do artificial vê não mais o material subordinado à forma, mas como seu progenitor, quando é informado pelo ambiente (OXMAN, 2009, p. 325). Neri emprega estratégias da natureza que direcionam a geração da forma para a minimização de recursos e a maximização da performance ao aplicar variações locais das propriedades materiais (Imagens 29 e 30). Seu trabalho emprega novos materiais sintéticos produzindo uma anisotropia⁶⁶ também sintética através do computacional (OXMAN, 2012).

Nesse campo, não só novos materiais surgem a partir da pesquisa, como biomateriais, materiais responsivos, compósitos, etc., como também novas abordagens às suas lógicas construtivas. Skylar Tibbits, fundador do The Self-Assembly Lab no MIT, investiga tecnologias de autoconstrução inspiradas em sistemas biológicos através de materiais programáveis (Imagem 31), já que acredita que nesta questão reside o ponto fraco das técnicas de fabricação digital, seu processo de montagem⁶⁷. A auto-montagem é um processo pelo qual as partes desordenadas constroem uma estrutura ordenada por meio da interação local entre elas, de forma autônoma. O meio, no caso a matéria, carrega sua própria programação ativada por algum tipo de energia, de preferência passiva (TIBBITS, 2012).

Dentre as muitas possibilidades sendo exploradas, o design inspirado na biologia⁶⁸ ganha destaque no momento como a teoria de ponta na emergência do design digital através da tecnologia. O design natural é mais do que imitar a aparência do orgânico, é aprender de princípios naturais de design como produzir formas que respondem a

66 Anisotropia é definida através de uma dependência direcional, ou seja, determinada característica do material varia de acordo com a direção e a localidade, se manifestando em diferenças nas propriedades físicas de um material, ou não uniformidade (OXMAN, 2012).

67 Ver TIBBITS, S. (ed.). *Autonomous Assembly: Designing for a New Era of Collective Construction*. Architectural Design Special Issue, v.87, no. 4. London: Wiley, 2017.

68 Para os cientistas genéticos Craig Venter e Daniel Cohen, o século 21 será o século da biologia assim como o 20 foi o século da física. Ver VENTER, C.; COHEN, D. *The century of biology*. *New Perspectives Quarterly*, V. 21, N.4, 2004, p. 73-77.

condições contextuais e que abarquem a complexidade, com potencial para criar uma “segunda natureza” (OXMAN, 2014, p. 8). No entanto, olhando de uma perspectiva mais ampla, essa é uma das vertentes do pensamento ao se ramificar em processos de geração formal. Ao longo dessa virada de século, a lógica aplicada à arquitetura passou da composição formal para a geração de formas, do objeto ao processo. Rivka e Robert (OXMAN e OXMAN, 2014, p. 55-61) identificam e exemplificam 6 modelos de geração formal predominantes na teoria e prática digital resumidos aqui:

1 Matemático: Exploração de fórmulas matemáticas como base de processos generativos.

2 Tectônico: Bem próximo ao modelo matemático generativo, aplica padrões tectônicos como base do processo de geração.

3 Material: Um tipo de geração tectônica baseada em modelos tridimensionais de estruturas materiais entrelaçadas.

4 Natural ou neo-biológico: Explorações de formas, fenômenos, processos, procedimentos, ou princípios biológicos encontrados na natureza como base de processos generativos.

5 Fabricacional: Emprega lógicas e técnicas de fabricação como base para o desenvolvimento de processos de design. Possui grande potencial de impacto na arquitetura digital através da expansão de capacidades e de escala do desenvolvimento tecnológico de fabricação.

6 Performativo: Modelo que une geração e análise através da computação, onde fatores ecológicos como dados físicos do contexto informam o design em um esquema paramétrico de relações na busca de uma solução de desempenho balanceado.

A importância outrora dada a conceitos de representação e manipulação de seus simbolismos, passa a novos métodos e processos, que fazem surgir novas relações. Para entender tais relações, a arquitetura digital vai em busca de outras áreas do conhecimento como a filosofia e a sociologia onde encontra a não-linearidade, interconectividade, continuidade, redes, dinamismo, e também em direção à ciência e biologia, de onde abarca a teoria da complexidade, caos, emergência, biomimética e morfogênese. Tudo isso vai compor o que Oxman chama de pensamento do design digital (*digital design thinking*).

“Digital design thinking is non-typological and non-deterministic in supporting and preferring the discrete and differentiated over the generic and the typological. More than simply a set of formal preferences, or the abandonment of traditional approaches to formal and typological knowledge (e.g. formal languages, typological classes and generic design, design cases, etc.) it explores new forms and relation-

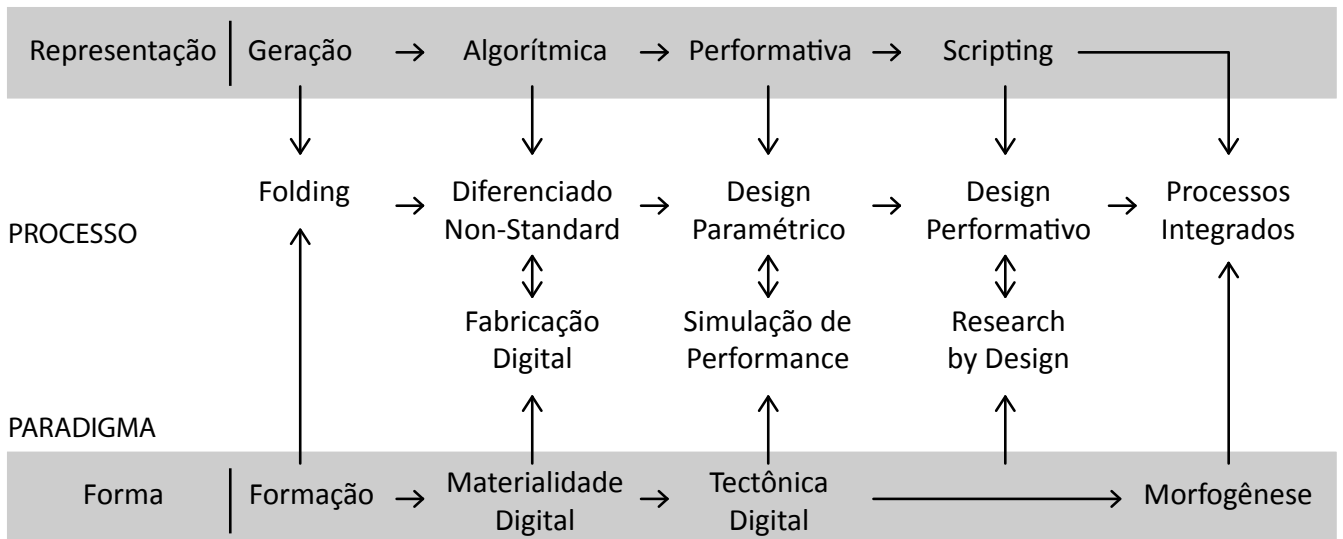
ships between the designer, image, and information. In this case, the 'shock of the new' is not simply in the discovery of new formal vocabularies, but in the establishment of new approaches to design. Here integration, non-formal morphogenesis, and parametric formation, etc. provide new avenues for design thinking. With respect to certain of the root concepts of conventional design theories, the implications of these transformations of models of digital design thinking have revolutionary implications." (OXMAN, 2006, p. 262).⁶⁹

Os modelos metodológicos que certamente vem causando maior impacto é o que abarca processos compostos integrados, ou seja, bebem de várias fontes e não se restringem a um único método, lidando de maneira inteligente com a informação para geração de design. São justamente esses modelos que trazem novos paradigmas à disciplina através da computação. A originação desses processos digitais é apresentada brevemente por Rivka e Robert em seu texto *Vitruvius Digitalis* (OXMAN e OXMAN, 2014, p. 1-9), sintetizada na tabela a seguir (Imagem 32). O esquema não representa uma história linear, mas a fonte evolutiva desses processos, que na prática se inter-relacionam em troca mútua em diversos arranjos.

Se o casal Oxman formula as bases do pensamento do design digital, Menges e Ahlquist resgatam o pensamento do design computacional, com sua edição especial da *Architectural Design, Computational Design Thinking* (2011), com textos que datam desde a década de 60. A diferenciação entre digital e computacional se faz necessária neste momento de grande profusão de processos e pensamentos, e inaugura uma nova fase na arquitetura, uma tomada de consciência do potencial computacional, que estava sendo muitas vezes subutilizado. A computação tem grande impacto na maneira como propomos e produzimos as formas, mas mais profundamente, na maneira como percebemos as formas. "A abordagem do design computacional tem como objetivo a execução de variados métodos intencionados a resolver as complexidades que existem na inter-relação e interdependência entre estruturas materiais e dinâmicas ambientais." (MENGES e AHLQUIST, 2011, p.26) Esses variados métodos de design computacional envolvem emergência da forma, evolução de populações, morfogênese generativa, dependências paramétricas, e principalmente, um pensamento de sistemas. A formulação de um pensamento computacional aplicado

69 "O pensamento do design digital é não-tipológico e não-determinístico ao se apoiar e dar preferência ao discreto e ao diferenciado em relação ao genérico e ao tipológico. Mais do que simplesmente um conjunto de preferências formais, ou o abandono de abordagens tradicionais ao conhecimento formal e tipológico (por exemplo linguagens formais, classes tipológicas e design genérico, casos de design, etc.), ele explora novas formas e relações entre designer, imagem e informação. Nesse caso, o 'choque do novo' não está simplesmente na descoberta de novos vocabulários formais, mas no estabelecimento de novas abordagens ao design. Aqui, integração, morfogênese não formal e formação paramétrica, etc., fornecem novos caminhos para o pensamento do design. Com relação a alguns dos conceitos básicos das teorias de design convencionais, as implicações dessas transformações de modelos do pensamento do design digital têm implicações revolucionárias." Tradução da autora.

LÓGICA



ao design bebe de diversas fontes desde a biologia e a matemática, como a ciência da computação, passando pela teoria dos sistemas e a cibernética. Nesse aspecto os editores não são analíticos ou classificatórios, mas apresentam um panorama do que acreditam constituir as bases do pensamento do design computacional. Entendemos, neste trabalho, como fundamental ir às fontes para compreender a gênese do pensamento computacional, o que faremos em seguida, mas antes disso, recorreremos a Mario Carpo, professor na Bartlett School of Architecture de Londres, para entender essa inflexão do digital ao computacional.

Sua obra recém-lançada, *The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence* (2017), nos fornece um desfecho da história até o presente momento, mas se mostra pessimista ao concluir que não há uma teoria do computacional, em todos os campos, político, social e cultural (p. 164). Seu entendimento do pensamento arquitetônico sempre foi embasado na comunicação e nas diversas mídias adotadas por nós arquitetos, pois se vivemos na Era da Informação, o entendimento e o aprimoramento de sua transmissão são fundamentais. Em 2011 dedicou um livro ao maior paradigma em transformação desse período, a diferenciação do design, onde explica nossa evolução do alfabeto ao algoritmo. Segundo o autor, as cópias idênticas, possíveis através da produção em massa, foram aspecto chave da cultura moderna. No entanto, a variabilidade digital vai contra todos os postulados sobre o idêntico que informaram a história da cultura tecnológica ocidental nos últimos 500 anos. No livro, Carpo traça a trajetória de ascensão e queda do paradigma das cópias idênticas. A diferenciação do design se torna então o grande marco da primeira “virada digital” e em 2013 publica uma edição especial da *Architectural Design*, *The Digital Turn in Architecture: 1992-2012*, com um apanhado de textos publicados pela mesma revista nesses 20 anos.

De lá pra cá, foi possível identificar um segundo marco, uma

Imagem 32: Evolução dos processos digitais descritos por Oxman e Oxman, 2014. Fonte: A autora (2018)



Search, don't sort.

Use Google search to find the exact message

Imagem 33: Slogan do Gmail entre 2004 e 2009, Google. Fonte: Tech World.

nova virada no pensamento digital, advinda de um desenvolvimento técnico quase banal, que de tão ubíquo, passou inquestionável pela grande maioria de nós (pelo menos aos mais novos): a nossa capacidade quase ilimitada de armazenamento e processamento de informações. Essa mudança na percepção cultural do valor da informação tem impactos disruptivos na arquitetura e na forma que a calculamos (CARPO, 2017, p. 18). Se estávamos aprisionados por uma capacidade limitada historicamente, demoramos a nos libertar mentalmente dela e hoje podemos explorar plenamente esse potencial do *Big Data*⁷⁰. Passamos da lógica da organização, essencial para o desenvolvimento da ciência analógica, para a lógica da busca diante de um mar de informações. Carpo utiliza o slogan do Gmail, usado entre 2004 a 2009 para exemplificar essa mudança, “pesquise, não ordene” (*search, don't sort*) (Imagem 33). Se durante os anos 90 predominou uma mentalidade de *small data*, a primeira virada digital foi marcada por novas máquinas e novas maneiras de produzir, com a mesma velha mentalidade científica. O que mudou na segunda virada não foram as máquinas, mas uma nova forma de pensar, uma nova ciência emergente, a ciência da busca da forma (*new science of form-searching*)⁷¹ (p. 39).

O modo tradicional de pensar e fazer ciência agrupa, compara, classifica e seleciona os fatos. A generalização e formalização de processos geram teorias que usamos para descrever e prever eventos semelhantes. No entanto, computadores não precisam funcionar através dessa lógica. Eles são capazes de simular eventos mesmo sem precedentes, fictícios. São capazes de otimizar resultados pela análise de possibilidades quase infinitas através de nossos requisitos (CARPO, 2017, p. 163). Os dispositivos computacionais de hoje em dia são imbuídos de inteligência artificial⁷², da qual podemos fazer uso em processos de design.

“Through computational form-searching we can already design new structures of unimaginable complexity. But precisely because it is unimaginable, this post-human complexity belies interpretation, and transcends the small-data logic of causality and determinism we have invented over time to simplify nature and convert it into reassuring, transparent, human-friendly causal models. Why does this unimaginably complex structures work, and the thousands of very similar ones we just run through FEA⁷³ simulation don't? Who knows. But the point is that it works, and that using today's digital tools this is the best - perhaps the only - way for us to work.” (CARPO, 2015, p. 27)⁷⁴

70 Big Data refere-se a uma quantidade enorme de informações nos servidores de bancos de dados. Diz-se que o Big Data se baseia em 5 V's : velocidade, volume, variedade, veracidade e valor. https://pt.wikipedia.org/wiki/Big_data

71 Em referência ao livro de Stephen Wolfram, *A New Kind of Science* de 2002.

72 Inteligência artificial é um conceito bem amplo, e John McCarthy, que cunhou o termo em 1956, a define como “a ciência e engenharia de produzir máquinas inteligentes”. Envolve capacidade de raciocínio, aprendizagem, reconhecimento de padrões e inferência. https://pt.wikipedia.org/wiki/Intelig%C3%A2ncia_artificial

Essa trajetória do pensamento digital ao pensamento computacional, não significa que um substitui o outro. Na verdade, o digital abarca o computacional, ou o subsume⁷⁵. O digital tem essa característica híbrida, pervasiva, trata do mundo virtual não-analógico, e por isso engloba muita coisa. O computacional, por sua vez, envolve processos orientados por dados e alta matemática (COLLETTI, 2013, p. 12), e por isso é restrito, demandando um emprego cuidadoso do termo. O computacional alargou o escopo do digital, ao permitir que mais dados e novas estruturas informem o processo de design (Imagem 34). Essa nova maneira de perceber a tecnologia é decorrente de um processo histórico do desenvolvimento da relação entre homem e computador, da própria evolução da linguagem em que nos comunicamos. Para tal, iremos apresentar um breve desenrolar dessa evolução, de como nos relacionamos com a tecnologia e sua lógica própria, para então nos situarmos aqui, no momento presente, na era pós-humana da Quarta Revolução Industrial⁷⁶ onde experienciamos uma nova concepção de espaço, o ciber-físico⁷⁷.

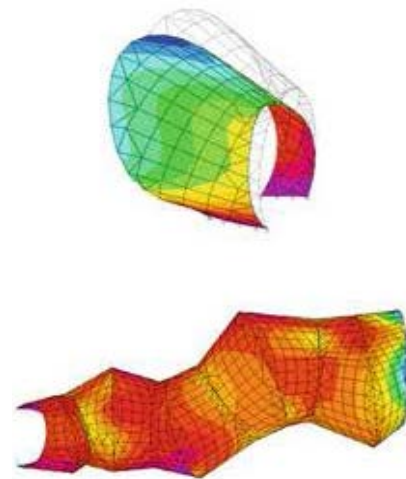


Imagem 34: Análise de Elementos Finitos do Caterpillar Gallery, construído na Universidade de Sevilha, 2014. Fonte: NARVÁEZ-RODRIGUEZ et al. 2014.

73 (Finite Elements Analysis) “Análise de Elementos Finitos ou Método dos Elementos Finitos trabalha convertendo uma faixa contínua de matéria homogênea em uma rede ou malha de pequenas partes contíguas. O equilíbrio desse sistema discreto é então calculado da maneira usual, mas o alto número de peças torna muito difícil a resolução usando ferramentas matemáticas tradicionais.” (CARPO, 2017, p. 174) e “É uma plataforma de software que facilita a visualização detalhada de onde as estruturas se dobram ou torcem, e indica a distribuição de esforços e deslocamentos. Tal software também pode permitir que propriedades específicas sejam examinadas, incluindo térmica, fluida e ambientes estruturais dinâmicos. No contexto da fabricação digital, a FEA pode ser muito valiosa na produção de visualizações de rigidez e resistência e, portanto, também na minimização de peso, materiais e custos.” (DUNN, 2012, p. 186). Tradução da autora. (Imagem 34).

74 “Através da busca computacional da forma, já podemos projetar novas estruturas de complexidade inimaginável. Mas precisamente porque é inimaginável, essa complexidade pós-humana engana sua interpretação, e transcende a lógica de small data de causalidade e determinismo que inventamos ao longo do tempo para simplificar. Este termo é usado por Lynn (1998) ao abordar a arquitetura animada quando diz que “uma abordagem da animação para a arquitetura subsume modelos tradicionais da estática em um sistema mais avançado de organizações dinâmicas.”. Abarcar e não rechaçar deve ser a postura adotada ao se desenvolver novos modelos, postulando-os relacionadamente em um fractal evolutivo. Ver Rohde, 2017. ficar a natureza e convertê-la em modelos causais tranquilizantes, transparentes e amigáveis. Por que essas estruturas inimaginavelmente complexas funcionam, e as milhares de outras muito semelhantes que acabamos de executar por meio da simulação de FEA não? Quem sabe. Mas o ponto é que funciona e que, usando as ferramentas digitais de hoje, esse é o melhor - talvez o único - caminho para trabalharmos.” Tradução da autora.

75 Este termo é usado por Lynn (1998) ao abordar a arquitetura animada quando diz que “uma abordagem da animação para a arquitetura subsume modelos tradicionais da estática em um sistema mais avançado de organizações dinâmicas.”. Abarcar e não rechaçar deve ser a postura adotada ao se desenvolver novos modelos, postulando-os relacionadamente em um fractal evolutivo. Ver Rohde, 2017.

76 A Quarta Revolução Industrial torna o espaço de produção inteligente ao abarcar Big Data, Cloud Computing, Fabricação Robótica, Sistemas Ciber-Físicos, etc., a chamada Indústria 4.0. https://pt.wikipedia.org/wiki/Industria_4.0

77 A ideia de espaço ciber-físico surgiu no início do século XXI, o espaço onde o mundo físico e o mundo virtual interagem através das redes. Veremos em 2.3 Como computar? os sistemas de produção que empregam esta lógica associada à Indústria 4.0. <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/cps/>

2.3 Como computar?

“An algorithm is not only a computer implementation, a series of line of code in a program, or a language, it is also a theoretical construct with deep philosophical, social, design, and artistic repercussions.” (TERZIDIS, 2006, p. xiii)⁷⁸

O bem sucedido empreendimento da tecnologia à guerra, na primeira metade do século XX, foi seguido de uma grande euforia em relação à ela e à nova perspectiva da cibernética, como uma nova forma de pensar o mundo, sistematicamente. Foi nessa época que surgiu “a perspectiva que a arquitetura poderia ser percebida e perseguida como um sistema” (MENGES e AHLQUIST 2011, p. 11), em substituição à ideia de arquitetura como máquina mecânica que já se encontrava degradada. Isso influiu não só no desenvolvimento de novas máquinas, mas em novos métodos exploratórios sobre como os computadores deveriam ser utilizados para expandir o intelecto humano. A teoria geral dos sistemas, de 1950, compilou sincronidades da ciência e preparou o campo para o estabelecimento da cibernética, a comunicação dos sistemas, que semeou uma diversidade de novas linguagens criadoras das imagens técnicas de Flusser. Esse foi o limiar de uma época, o final da segunda era da máquina onde predominou o pensamento produtivista unidirecional, que tinha como modelo a própria máquina. O que se seguiu foi a visão de sistema como um organismo funcional, dinâmico e aberto, e que por isso demanda uma abordagem integral.

Foi a partir da tomada de consciência da semelhança entre princípios gerais em diversas áreas da ciência que a perspectiva científica começou a mudar. Se a abordagem era reducionista e isolada, ela já não mais abarcava a complexidade das interações dinâmicas observadas. Independente das propriedades particulares de cada área parecia haver correspondências gerais entre diversos sistemas que então conduziram a uma elaboração de uma Teoria Geral dos Sistemas, pelo biólogo austríaco Ludwig von Bertalanffy (1968). Essa teoria entende ‘sistema’ como um conjunto de elementos em interação dinâmica. Duas condições são fundamentais nessa operação do sistema: a equifinalidade e a retroação, ou *feedback*⁷⁹. A primeira diz respeito à busca de seu estado final que pode ser atingido com diferentes condições iniciais e através de diversos meios, ou seja, não existe ‘A’ maneira correta de se conduzir essas interações, mas várias possibilidades que levam a

78 “Um algoritmo não é apenas uma implementação de computador, uma série de linhas de código em um programa ou uma linguagem, é também uma construção teórica com profundas repercussões filosóficas, sociais, de design e artísticas.” Tradução da autora.

79 No contexto da robótica Peter Testa define *feedback* como “um sinal do equipamento robótico sobre as condições como elas realmente existem, em vez de como o computador as orientou a existir”. (TESTA, 2017, p. 296) Tradução da autora.

resultados equivalentes. A segunda trata da informação sobre a reação a um estímulo. Se o sistema se encontra em constante transformação é preciso ter informação reinvestida para comunicar sua situação, o estabelecimento de um diálogo entre o emissor e o receptor. A intenção última dessa interação retroativa é garantir o equilíbrio homeostático do sistema, que sempre visa um estado balanceado no caso de organismos vivos, ou apenas a meta inicialmente estabelecida em sistemas artificiais.

Segundo Menges e Ahlquist (2011, p. 26), o que se extrai dessa noção é que o resultado de um sistema é apenas 'UM' estado do sistema, consequência de seus *inputs*, *outputs* e *feedbacks*, mas existem muitos outros estados possíveis em constante flutuação. Esse dinamismo reflete sua essência impermanente, onde o sistema, assim como tudo que existe se encontra em constante transformação. Essa teoria se aplica não só aos sistemas da natureza, como aos diversos sistemas criados pelo homem, dos tecnológicos aos sociais. Os propósitos da teoria são bem ambiciosos e um tanto *avant-garde*, pois vemos que ainda nos falta muito chão para alcançá-los. Bertalanffy (1968, p. 62) os pontua da seguinte forma: há uma tendência geral no sentido da integração na várias ciências, naturais e sociais; esta integração parece centralizar-se em uma teoria geral dos sistemas; esta teoria pode ser um importante meio para alcançar uma teoria exata nos campos não físicos da ciência; desenvolvendo princípios unificadores que atravessam "verticalmente" o universo das ciências individuais, esta teoria aproxima-nos da meta da unidade da ciência; isto pode conduzir à integração muito necessária da educação científica.

Isso nos leva ao ponto da educação da arquitetura, em respeito à integração de novas áreas do conhecimento à formação dos arquitetos em uma era tecnológica. No entanto, antes disso precisamos esclarecer os meios utilizados na comunicação computacional que são imprescindíveis aos arquitetos de agora que desejam explorar o potencial tecnológico de nossa época 4.0. A teoria dos sistemas está diretamente relacionada à teoria da comunicação, que gira em torno da informação, seu controle e retroação. Bertalanffy (1968, p. 68) nos apresenta um esquema do funcionamento básico do fluxo de informações em um esquema de retroação (Imagem 35). O receptor, que pode ser de qualquer natureza, biológica ou eletrônica, recebe um es-

Imagem 35: Esquema de retroação simples apresentado por Bertalanffy, 1968. Fonte: BERTALANFFY, 1968, p. 68.

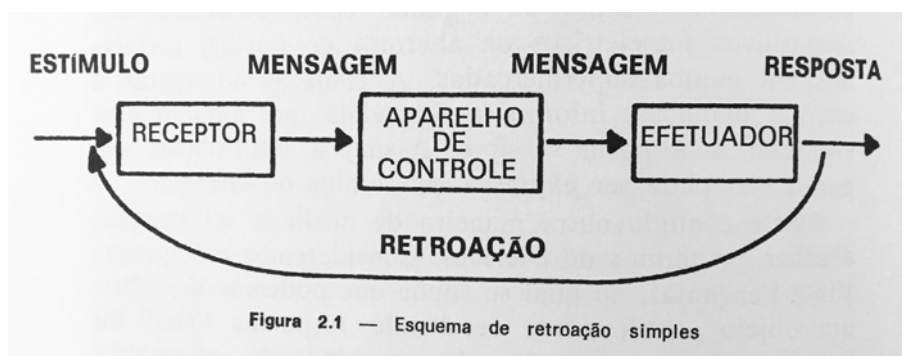


Figura 2.1 — Esquema de retroação simples

tímulo que é processado pelo sistema de controle, que gera uma resposta ativa. Essa resposta é reabsorvida pelo receptor, e computada novamente por seu sistema de controle. Esse sistema é autorregulado, pois é capaz de informar respostas a ações, gerando novos tipos de ações. Grande variedade de sistemas naturais e tecnológicos aplicam estes princípios, mas também existem outros tipos de sistemas.

Christopher Alexander, arquiteto professor na University of California em Berkeley, teve grande influência na ciência da computação com seu trabalho *A Pattern Language* de 1977, inaugurando o movimento da linguagem de padrões. Em seu artigo de 1968, *Systems Generating Systems*, subdivide a ideia de sistema em 'sistema como um todo' e 'sistema generativo' que origina esse mesmo sistema, estabelecendo conceitos fundamentais para o desenvolvimento de uma metodologia de processo computacional. O 'sistema como um todo', ou sistema holístico, apresenta seus diversos comportamentos, uma coleção de ações e interações que não representam um objeto em si, mas o nosso entendimento sobre ele. Um tipo diferente de sistema gera o anterior, o generativo, definidor das regras que comandam esses comportamentos. Segundo ele, quase todo sistema como um todo é criado por um sistema generativo, e se quisermos que as coisas funcionem integralmente, precisamos inventar sistemas generativos capazes de criá-las dessa forma. Esses sistemas generativos são o processo mesmo que dá sentido ao todo, definido pelas suas limitações (*constraints*) que estabelecem interações. No entanto, Alexander alerta, existem sistemas generativos que não levam de forma alguma a sistemas holísticos, pois são sistemas vazios de interações significativas (1968, p. 59).

O mesmo Alexander que estabelece conceitos tão importantes para o desenvolvimento de novas metodologias de design computacional foi um dos críticos que mal interpretou e subestimou o potencial da computação em seus primórdios. Em seu texto *A Question of Computers in Design* (1967), citado por Frazer (1995b), um ano antes, afirmou:

“A digital computer is, essentially, the same as a huge army of clerks, equipped with rule books, pencil and paper, all stupid and entirely without initiative, but able to follow exactly millions of precisely defined operations. (...) In asking how the computer might be applied to architectural design, we must, therefore, ask ourselves what problems we know of in design that could be solved by such an army of clerks (...) At the moment, there are very few such problems.” (ALEXANDER, 1967, In: FRAZER, 1995b)⁸⁰

80 “Um computador digital é, essencialmente, o mesmo que um enorme exército de funcionários, equipado com livros de regras, lápis e papel, todos estúpidos e totalmente sem iniciativa, mas capazes de seguir exatamente milhões de operações precisamente definidas. (...) Ao perguntar como o computador pode ser aplicado ao projeto arquitetônico, devemos,

Hoje em dia, os problemas que podem ser endereçados ao computador estão bem explícitos, sendo os sistemas generativos mesmo, um dos principais, como aponta John Frazer (1995a). Mas antes mesmo de endereçar essas questões, é preciso compreender como se comporta o fluxo de informações, a comunicação dos sistemas. A cibernética foi postulada por Norbert Wiener, matemático do MIT, que percebeu a importância da informação se destacando em relação à matéria ou à energia dos mecanismos que estavam sendo pensados à época. Em seu livro de 1948, *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, teve grande impacto no desenvolvimento de tecnologias e no pensamento sobre a programação de seus sistemas. A influência da cibernética no pensamento do design ficou clara a partir do texto de Gordon Pask de 1969, *The Architectural Relevance of Cybernetic*, teórico que influenciou várias áreas do conhecimento através do pensamento cibernético. Em seu artigo, Pask identifica uma mudança da visão arquitetônica de um objeto estático material para uma compilação de sistemas ativos, interpretando conceitos informacionais para fundamentar uma abordagem cibernética da arquitetura.

Cibernética trata da comunicação de sistemas, seu controle e geração de feedback. São sistemas definidos por um propósito onde atuam o controle, a retroação e a regulação (WIENER, 1950). O termo cibernética vem do grego, e significa conduzir, guiar, e por isso prescinde de um objetivo, de um propósito para o qual o sistema irá operar⁸¹. Todos os sistemas inteligentes têm essa capacidade de conduzir à meta estabelecida através de correções, estabelecidas por loops de feedback em um processo de autorregulação. Ao mesmo tempo em que a sua operação tem um propósito, cada sistema tem também suas limitações, uma capacidade finita de computar que opera de acordo com o seu design. Pask ilumina a relação ‘controlador/sistema controlado’ que aplicada ao projeto de arquitetura se configura ‘designer/sistema projetado’, onde o designer controla a construção do sistema de controle, ou do sistema generativo, ou seja, o designer está no controle do controle, se estabelecendo em uma posição de hierarquia organizacional mais elevada, mas nem por isso mais autoritária, já que o sistema que cria tem capacidades próprias para gerar o sistema holístico final. O que chama a atenção nesse momento é a mudança do papel do arquiteto, como autor do sistema de design, o qual se torna coautor do design final.

“The design goal is nearly always underspecified and the ‘controller’ is no longer the authoritarian apparatus which this purely technical name commonly brings to mind. In contrast the controller is an odd mixture of catalyst, crutch, memory and arbiter. These, I believe, are

portanto, nos perguntar quais problemas nós conhecemos no design que poderiam ser resolvidos por tal exército de funcionários (...) No momento, há muito poucos problemas assim.”
Tradução da autora.

81 Ver *What is cybernetics?* Com Paul Pangaro. <https://vimeo.com/41776276>

the dispositions a designer should bring to bear upon his work (when he professionally plays the part of the controller) and these are the qualities he should embed in the systems (control systems) which he designs.” (PASK, 1969, p. 76)⁸²

Paul Pangaro, que participou do início do Architecture Machine Group do MIT, foi discípulo direto de Gordon Pask. Desde então trabalha com a cibernética voltada para o desenvolvimento estratégico de diversas áreas, aprofundando seus conceitos e modos de operar no mundo mercadológico de hoje. Em seu artigo de 2015, em colaboração com Hugh Dubberly, sistematiza as bases que acredita fundamentar a prática do design no século XXI, desenvolvendo o pensamento da seguinte forma:

- Se design, então sistemas.
- Se sistemas, então cibernética.
- Se cibernética, então cibernética de segunda ordem.
- Se cibernética de segunda ordem, então conversação.

O momento em que nos encontramos é de alto nível de desenvolvimento tecnológico e computacional, impactando profundamente a percepção da arquitetura, vista anteriormente como uma forma concebida, passa a ser entendida como um sistema criado, que dá suporte a interações humanas. Para a concepção do design nesses moldes é imprescindível o entendimento e a habilidade de desenvolver sistemas. Os sistemas operam sob regras cibernéticas, com um objetivo definido, *feedback* e aprendizado. Mas para sua aplicação ao design não basta observar os sistemas atuarem (cibernética de primeira ordem), mas o designer se coloca dentro dele, fazendo parte do sistema que cria, através de conversação (cibernética de segunda ordem) (Imagem 36). Os sistemas não são independentes, mas têm a participação subjetiva de seu autor, que o enquadra, molda de acordo com os seus princípios. Na perspectiva da cibernética de segunda ordem, o design é conversação para mútuo aprendizado, máquina e humano se desenvolvem juntos. Ranulph Glanville, também discípulo de Gordon Pask, mas de uma geração anterior, desenvolveu a analogia entre design e cibernética de segunda ordem da seguinte maneira, design é a ação, cibernética a explicação, entendendo a cibernética como um modo de pensar e de agir (DUBBERLY e PANGARO, 2015). Para ele, assim como Pangaro, essa conversa precisa ser endereçada aos problemas sócio-ambientais

82 “O objetivo do projeto é quase sempre subespecificado e o ‘controlador’ não é mais o aparato autoritário que esse nome puramente técnico geralmente traz à mente. Em contraste, o controlador é uma estranha mistura de catalisador, muleta, memória e árbitro. Estas, eu acredito, são as disposições que um designer deve trazer para o seu trabalho (quando ele desempenha profissionalmente a parte do controlador) e estas são as qualidades que ele deve incorporar nos sistemas (sistemas de controle) que ele projeta.” Tradução da autora.

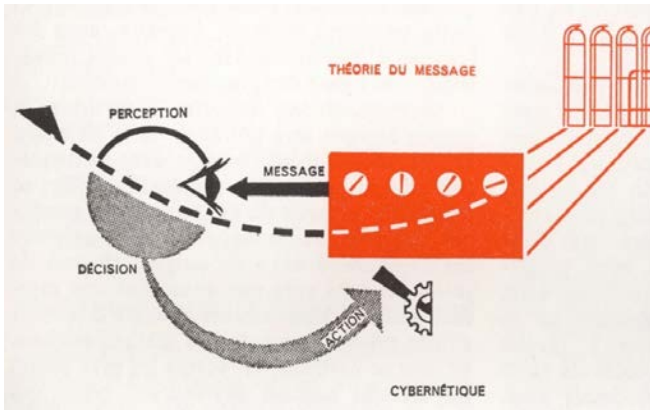
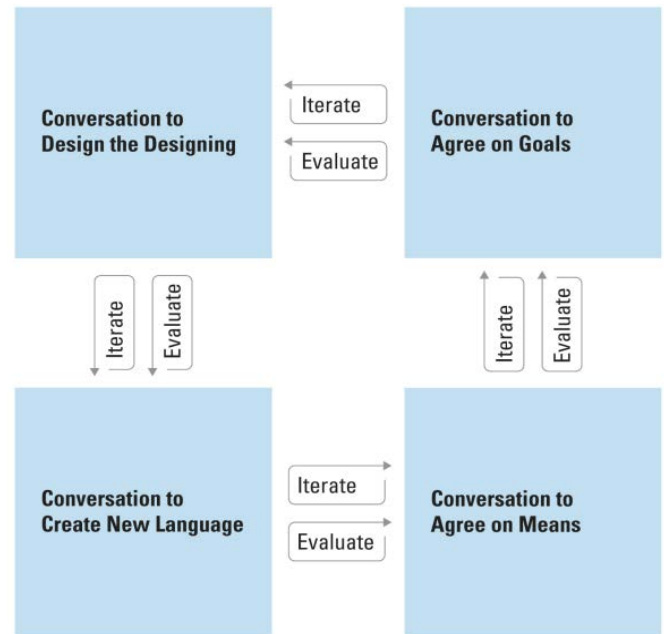


Imagem 36: Cibernética de segunda ordem. Fonte: Paul Pangaro.

Imagem 37: Processo de Design Thinking co-evolucionário. Fonte: Paul Pangaro.



mal-definidos (*wicked problems*) do nosso tempo, os problemas relacionados às nossas crises que têm impacto direto na qualidade de vida do planeta. Estes problemas não possuem uma solução definitiva, e nem mesmo uma formulação consensual. Isso requer do designer visões e valores que são acompanhadas de um senso de responsabilidade por tais questões aplicadas no processo de design.

Se design é conversa, precisamos entender como ela se dá, para então estabelecer o contexto adequado para que ela aconteça (Imagem 37). Para Pangaro⁸³, a conversa começa ao se estabelecer as metas, e o autor se utiliza do verbo “concordar” com as metas (*agree on goals*), pois para ele, não nos encontramos mais em uma era individualista do gênio criador do objeto, mas atuamos coletivamente em um sistema vivo e participativo. Com as decisões tomadas de onde se quer chegar, e com um por que embasado, a conversa segue para o design do design (*design the designing*), ou seja, o desenho do processo de design. O design final visto como um estado de possibilidades requer o design de um sistema de design para definir o espaço de possibilidades, e para isso conhecimentos imprescindíveis são agrupados para formar seu *framework*⁸⁴. Com o framework de trabalho estabelecido, é definida a linguagem que irá definir o espaço de possibilidades do design. E então os meios são concordados (*agree on means*) para alcançar os objetivos inicialmente estabelecidos, o planejamento em si das ações de trabalho. O processo não é visto de forma linear, onde uma etapa leva à outra, mas estão em constante feedback, realizando iterações e avaliações, e assim, mantendo a qualidade do sistema. Essa perspectiva cibernética de um processo de design é aplicável a diver-

83 <http://www.pangaro.com/CUSO2014/Pangaro%20CUSO%202014%20DESIGN%20Final.pdf>

84 O termo *framework* vem da área da informática, e engloba um conjunto de conceitos, critérios e práticas para abordar um problema de domínio específico. https://en.wikipedia.org/wiki/Software_framework

sas áreas criativas, inclusive, para a produção de arquiteturas.

Essas novas maneiras de pensar foram fundamentais não só no campo conceitual, mas no campo prático tecnológico. Para chegarmos ao nível de desenvolvimento atual das tecnologias robóticas, foi fundamental o desenvolvimento da teoria de controle⁸⁵, teoria da informação⁸⁶, seguidas pela cibernética e pela teoria dos sistemas. Para uma máquina ser considerada inteligente, possuir inteligência artificial, é preciso que seja capaz de realizar raciocínios complexos, o que envolve possuir modelos internos do mundo, buscar soluções possíveis, planejar e raciocinar para resolver problemas, representar simbolicamente informações, possuir um sistema de organização hierárquico e executar sequencialmente programações (MATARIC, 2014, p. 33). Esse passa a ser também um dos universos de ação dos arquitetos que se engajam em sistemas ciber-físicos para construir seus sistemas generativos de design através do uso de robôs para sua fabricação digital.

O diálogo entre homem e máquina é feito a partir de novas linguagens que apesar de serem lógicas e racionais em seus elementos e sintaxe, não necessariamente geram produtos duros e racionais. Tradicionalmente os algoritmos⁸⁷ eram usados na matemática e na lógica para resolver problemas práticos, e sua aplicação em sistemas computacionais se deu como “estruturas para a implementação de problemas a serem realizados por computadores” (TERZIDIS, 2006, p. 15). Os algoritmos se tornaram uma versão racionalizada do pensamento humano, mas apesar de serem precisos e definitivos, é possível expressar certas qualidades humanas desejáveis ao design, como a imprecisão e a ambiguidade. Trata-se apenas da maneira em que suas declarações são articuladas. Assim como manipulamos a linguagem verbal em direção a ambiguidades de sentido, uma pessoa fluente em programação será hábil a fazer a mesma coisa, em manipular informações digitais para alcançar a expressividade desejada através de outra linguística.

O início dessa lógica, de tradução do mundo real para um mundo virtual se deu muito antes da era digital. Segundo Carpo (CARPO, 2011, p. 54) Alberti, entre 1430 e 1440, inaugurou as imagens digitais ao substituir a imagem analógica por listas numéricas e instruções computacionais, um algoritmo, capaz de recriar a imagem original. Alberti sabia das limitações da cópia manual da época, e com o intuito

85 Teoria sobre o comportamento de sistemas dinâmicos na matemática e engenharia. https://en.wikipedia.org/wiki/Control_theory

86 “Teoria da informação: Teoria matemática sobre sistemas de comunicação, transmissão de dados, criptografia, codificação, ruídos, compressão de dados etc. Teve início com a publicação de um artigo de Claude E. Shannon em 1948, intitulado *A mathematical theory of communication.*” (CELANI, 2008, p. 290)

87 “Lista de procedimentos necessários para executar uma determinada tarefa. A palavra algoritmo que é comumente utilizada para designar programas de computador, tem sua origem no nome do matemático e astrônomo persa Al-Khwarizmi, autor de um tratado sobre cálculo numérico, que viveu no século IX a.C.” (CELANI, 2008, p. 279)



Imagem 38: Reconstrução do mapa de Roma a partir das coordenadas de Alberti. Fonte: Archinect

de preservar as medidas originais do mapa de Roma, inventou uma maneira de digitalizá-lo utilizando coordenadas geográficas. Foi o primeiro arquivo digital de uma imagem que poderia atravessar o tempo-espaço com suas propriedades preservadas. Assim, o mapa poderia ser fielmente reproduzido, e mesmo reescalado por qualquer um que tivesse acesso ao algoritmo e à ferramenta de desenho (Imagem 38). A imagem analógica passou a ser uma informação virtual.

Essas informações que estavam entrando no mundo virtual precisavam de uma programação para se relacionar entre si, para executar ações também no campo virtual. A primeira teoria da programação é atribuída a Augusta Ada Lovelace que em 1842 traduziu um artigo sobre a Máquina Analítica (1837) de Charles Babbage⁸⁸, e acrescentou a ele seus comentários inimaginados até mesmo por Babbage, desenvolvendo uma teoria da programação (KILIAN, 2017a, p. xx). Na época, Ada Lovelace era raríssima exceção, pois a grande maioria das mulheres não recebia educação, muito menos em áreas da ciência como a matemática. A máquina não foi construída, mas Lovelace conseguiu olhar de forma visionária esse mecanismo, imaginando possibilidades para ela executar mais do que cálculos matemáticos. Ao escrever os princípios da programação computacional, Lovelace observa: “A Máquina Analítica não tem pretensões para *originar* nada. Ela pode fazer *aquilo* que sabemos ordená-la a executar.”⁸⁹. Sua afirmação causou objeções como a de Turing (1950) e Mitchell (1975) em relação à diversidade de comportamentos obtidos, e à criatividade e originalidade que poderiam ser alcançadas através das máquinas, iniciando a questão da autoria, ainda muito debatida no design digital⁹⁰.

88 Charles Babbage, matemático do século XIX, desenvolveu a Máquina Analítica e a Máquina Diferencial, tidas como proto computadores para tarefas específicas. (GERE, 2002)

89 Disponível em: <http://www.fourmilab.ch/babbage/sketch.html>

90 Ver FOK, W. W.; PICON, A. (eds). *Digital Property: Open-Source Architecture*. Architec-

Para Turing, não se tratava do questionamento se máquinas são capazes de pensar, mas se máquinas poder agir da mesma forma que nós seres pensantes agimos. Era o momento de concepção do aprendizado da máquina (*machine learning*), onde o homem ensina a máquina a aprender, a progressivamente se aprimorar a partir das informações que gera.

A questão chave que podemos extrair de Lovelace é sobre nosso próprio aprendizado para dar essas ordens, principalmente na geração do que não foi anteriormente concebido, orientar a máquina a resultados inesperados por nós, os quais somente ela tem capacidade de computar. Através do uso inteligente da máquina, sistemas generativos podem levar a grandes surpresas e aparentar originalidade a partir de critérios bem aplicados (MITCHELL, 1975, p. 146), dependendo da capacidade do programador de extrapolar a racionalidade do sistema. Passamos a ordená-la a aprender, e além disso, orientamos sua capacidade de processamento ultrapoderosa para nos mostrar coisas que não foram anteriormente pensadas ou imaginadas, a constante busca pelo novo. A relação passa então a ser de conversa mais do que ordem. Essa questão ressoa com a ideia de design apresentada anteriormente, onde sua etimologia grega se refere à busca pelo elusivo, mas também a um passado, à busca por algo que já possuímos, mas que não possuímos mais. Essa originalidade buscada através do algoritmo computacional vai em direção à ‘redescoberta do novo’, a um estado do passado em esquecimento, pois “nada surge do nada e nada desaparece no nada”⁹¹. Tudo se transforma, constantemente. Se o discurso do novo como algo inédito embasou as concepções modernistas que queriam reescrever a história em uma folha em branco, Terzidis (2006, p. 3) leva essa busca pelo novo em direção aos arquétipos primitivos a serem reavivados, que já o foram de tempos em tempos ao longo da história da arquitetura. No entanto, a questão aqui é a emergência do design através do algoritmo, da conversa que estabelecemos com a máquina na busca pela geração da forma, ela nasce de algo, não é espontaneamente auto-gerada. E se ela vem de algum lugar do passado, não são de arquétipos e valores que uma vez já representaram uma época, pois estes se desatualizam, envelhecem. Não se trata de ir em busca do primitivo, mas do primordial. Esse retorno a algo que existe, mas que perdemos é justamente a essência humana imanente, transparecida pelas nossas construções. Nesse momento se faz necessário o questionamento sobre como interagimos com a tecnologia, pois as máquinas operam no mundo subjugadas pelo modo que nós operamos nele, de acordo com as nossas crenças e valores que são inseridos nelas. As tecnologias que criamos são informadas por quem somos, possuem a nossa essência⁹². Para Paul Pangaro (HENRIKSEN et al.,

tural Design Special Issue, v.86, no. 5. London: Wiley, 2016.

91 Aforismo pré-socrático.

92 Mark Burry, em seu artigo *Cultural Defence* (OXMAN e OXMAN, 2014, p. 383-406), conta sua própria trajetória em *scripting* e levanta diversas questões, as quais endereçou a um grupo seletivo de arquitetos. O resultado dessa pesquisa revela diferentes posturas, desa-

2017), a criatividade, essa nossa busca pela originalidade, é um modo de ‘re-vermos’ o mundo a partir de uma nova perspectiva, e a partir do que revemos, reimaginamos e podemos oferecer algo significativo.

“So, the reason why coders should study philosophy and ethics and other humanistic domains, is again about creativity and fostering new insight, but also to be conscious of their values and to know that every line of code they write has some value implicit in it. And is that the value that they want?” (PANGARO In: HENRIKSEN et al., 2017)⁹³

A integração da educação científica proposta por Bertalanffy (1968) é o caminho para a unidade da ciência que se prevê para o futuro. Então, não se trata apenas de inserir a programação e a robótica na formação dos arquitetos, mas oferecer uma formação integral também em relação às disciplinas humanas, sociais e políticas, pois serão esses valores que irão operar os algoritmos generativos do futuro. A cibernética sempre foi interdisciplinar, foi pensada por antropologistas, linguistas, filósofos, engenheiros e matemáticos, e assim deve caminhar. Se precisamos cada vez mais de especialistas com conhecimentos profundos para conduzir sistemas complexos, eles devem trabalhar em conjunto, em equipes multidisciplinares em uma constante troca de saberes. Gabriela Celani (2018) ao analisar o panorama brasileiro levanta a hipótese de que se inovarmos na formação dos arquitetos, que se encontra estagnada em seus métodos e tecnologias, poderemos ter, a médio e longo prazo, um real avanço da produção brasileira nos habilitando a participar das discussões internacionais. E aponta que para isso, não apenas a formação do arquiteto deve ser atualizada, mas mudanças estruturais mais profundas no sistema de ensino precisam acontecer, interconectando diferentes áreas do conhecimento. Se o design é a maneira que nós arquitetos temos de rever o mundo, a programação é a forma de reescrever esse mundo em sua pluralidade.

“Programming is a way of conceiving and embracing the unknown. It becomes a way of exploring and mapping our own way of thinking. (...) Programming is an important part of design education and

fios e perspectivas desse caminho a ser trilhado para se tornar um arquiteto programador. Há um consenso que programação é uma habilidade difícil de se adquirir, já que requer um pensamento lógico diferente do que estamos acostumados a usar no processo criativo, mas necessária para extrapolar limitações. Algumas das motivações que levaram os arquitetos a aprender a programar são: computar performance, explorar processos generativos, acessar níveis profundos de imaginação, obter rapidamente interações e variações, ser forçado a ser explícito, se divertir, estudar fenômenos, e claro, a automação de tarefas. A motivação é um reflexo de cada um, revela suas demandas imediatas, como uma agenda pessoal. Outra pergunta que poderia levar essa investigação mais a fundo na especulação sobre os resultados dessa exploração computacional para nosso futuro coletivo seria: qual a sua aspiração?

93 “Então, a razão pela qual programadores deveriam estudar filosofia e ética e outros domínios humanísticos, é novamente sobre criatividade e fomentar novos insights, mas também para estar consciente de seus valores e saber que cada linha de código que eles escrevem tem algum valor implícito nela. E é esse o valor que eles querem?” Tradução da autora.

practice. Programming involves more than simple problem solving, because it is the only way to use the computer to its full capacity, and for challenging known facts. Programming is the vehicle for obtaining new knowledge, for seeing things that can't not been seen, and for taking your fate, as a designer and an architect, in your own hands." (TERZIDIS, 2006, p. 153-154)⁹⁴

Um algoritmo pode ser visto como um mediador entre a mente humana⁹⁵ e o poder de processamento do computador. São regras claras expostas em um número finito de etapas, como uma receita, mas sua expressão linguística é adaptada para a lógica do computador (Imagem 39). Segundo Terzidis (2006, p. 17), apesar da lógica computacional ser um produto da mente humana, ela difere, funciona paralelamente. Para sermos capazes de controlar a máquina é preciso ajustar o raciocínio para um raciocínio computacional, através da programação, sendo esta, a programação, "uma maneira de explorar e mapear nossa própria maneira de pensar." É um meio de experimentar e ir além através de regras, princípios e resultados que ajudam a ver o problema, adereçar possíveis soluções e revelar novos problemas dentro do processo.

Nos primórdios do design digital, da gramática da forma e do parametricismo não-visual, os arquitetos digitais necessariamente precisavam ser programadores. Com o aumento da capacidade de processamento dos computadores, as interfaces gráficas permitiram que as manipulações formais se dessem diretamente na tela através de pontos de controle e vetores. Popularizou-se o uso do computador como ferramenta para operações de manipulação ao invés de derivações por notações matemáticas ou *scripts*⁹⁶ (McCULLOUGH, 2006). Desde então novos softwares para programação visual, estão reintroduzindo a computação no processo de design de forma mais acessível. Através de interfaces gráficas amigáveis é possível construir algoritmos através da lógica da programação, sem a linguagem em si. No entanto, os "arquitetos digitalmente inteligentes" que querem explorar todo o potencial da computação precisam desembulhar o pacote e entrar na caixa

94 "Programação é uma maneira de conceber e abraçar o desconhecido. Torna-se uma maneira de explorar e mapear nossa própria maneira de pensar. (...) A programação é uma parte importante da educação e prática do design. A programação envolve mais do que simples solução de problemas, porque é a única maneira de usar o computador em sua capacidade total e de desafiar fatos conhecidos. A programação é o veículo para obter novos conhecimentos, para ver coisas que não podem ser vistas e para tomar seu destino, como designer e arquiteto, em suas próprias mãos." Tradução da autora.

95 Com os avanços da ciência cognitiva, podemos abordar a mente a partir da cognição incorporada (*embodied cognition*), onde ela não é limitada ao cérebro, visto de maneira funcionalista como um tipo de computador, mas está relacionada à todo o organismo, influenciada pelo contexto e pelas percepções, e por isso conectada à experiência direta, uma mente incorporada. Ver VARELA, F.; ROSCH, E.; THOMPSON, E. *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. Cambridge: MIT Press, 1992.

96 *Scripts* são programas escritos para um ambiente de tempo de execução especial que automatizam a execução de tarefas, e funcionam em uma linguagem de programação. https://en.wikipedia.org/wiki/Scripting_language#cite_note-ecma262-1

Receita de bolo de vó

Ingredientes:

4 colheres de sopa de farinha de trigo
4 colheres de sopa de maizena
4 colheres de sopa de manteiga
2 colheres de chá de fermento
1 pitada de sal
1 xícara de açúcar
4 claras em neve
4 gemas

codigo

declarar variaveis

```
farinha = 120g;    claras = 4;  
maizena = 60g;    gemas = 4;  
manteiga = 160g; tabuleiro = untado;  
fermento = 20g;  massa;  
sal = 6g;         neve;  
acucar = 200g;   secos;
```

funcao preparar

```
neve = bata (claras)  
massa = bata (acucar, gemas, manteiga)  
secos = peneire (farinha, maizena, sal, fermento)  
massa = bata (massa, secos)  
massa = misture (massa, neve)  
tabuleiro = despeje (massa)
```

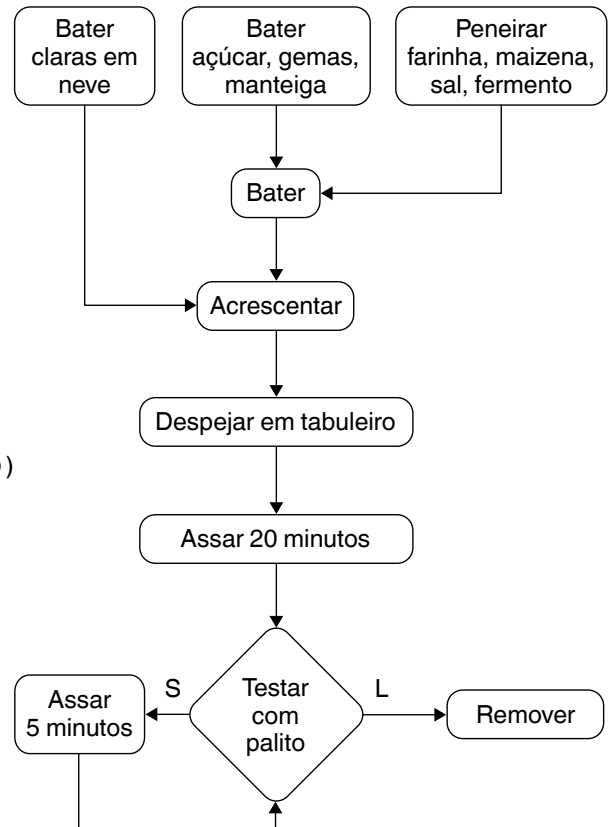
funcao assar

```
assar (tabuleiro)  
tempo (1200000)  
se (palito = sujo)  
assar (tabuleiro)  
tempo (300000)  
se (palito = limpo)  
remover
```

Preparo:

Bata as claras em neve e reserve. Bata o açúcar, as gemas e a manteiga. Misture os demais ingredientes secos peneirados. Acrescente as claras em neve, misturando levemente. Despeje em tabuleiro untado e leve ao forno por 20 minutos até o palito sair limpo.

Algoritmo



preta para alçar um patamar mais complexo, acessível apenas através de *scripts*.

Para Malcom McCullough (2006, p. 187), desenvolvedor de produtos da Autodesk desde a década de 80, esse reavivamento da programação na arquitetura se dá por alguns motivos. Primeiro, por conta das possibilidades de fabricação digital que, há época de seu artigo, ocupavam grande parte do discurso digital. Era preciso expressar e manipular o design em termos de processos de fabricação, através de variáveis e funções. Segundo, há grande interesse na biologia como fonte de inspiração para o design, e a programação permite explorar suas regras de crescimento e emergência através de processos generativos. Terceiro, o maior controle sobre a informação através da tecnologia leva a novas possibilidades organizacionais, levando a novas práticas e processos de design customizados. Isso permite aos arquitetos conduzir novos métodos de design, seja para um projeto específico, ou como forma de identidade de expressão. E por último, uma nova geração de arquitetos com formação computacional está surgindo, e o autor, indo contra a corrente da atenção plena (*mindfulness*) que

Imagem 39: Receita de bolo de vó como algoritmo. Fonte: A autora (2018) a partir de imagem da internet.

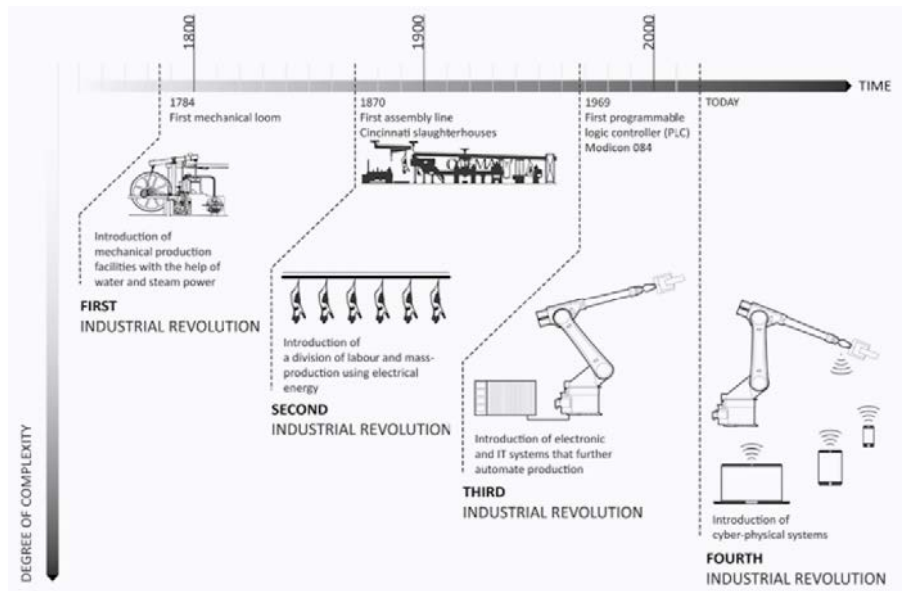
se espalharia pelo meio empresarial à época, considera que “as interrupções e multitarefas, a atenção fragmentada podem ser vistas como uma vantagem.”. O fato é que a programação abre novas possibilidades, permite trabalhar com uma grande quantidade de informação, e ter o trabalho ramificado simultaneamente em diversas direções, para mais tarde ter essas informações reagrupadas. Nos permite ir além de nossas próprias capacidades ao conduzir explorações, torna a fabricação mais eficiente, nos permite ir em direção à complexidade, e também à simplicidade (OXMAN e OXMAN, 2014, p. 394).

Mas o que há na caixa preta digital hoje em dia? Dos anos 60 para cá tivemos algumas substanciais mudanças da percepção do espaço. De um mundo sólido e físico começaram a emergir e fluir informações digitais ao ponto de criarem um espaço paralelo, onde passamos também a existir, o ciberespaço. Com o lançamento da internet nos anos 90 e a difusão dos computadores, muitas atividades e relações começaram a ser realizadas no campo virtual, um campo sem materialidade, puramente informacional. As relações se complexificaram em redes globais, e segundo Frazer⁹⁷ (1995a), o ciberespaço foi apenas uma das manifestações de transformações profundas no nosso modo de pensar, de nossa consciência humana. O termo ciberespaço é derivado da cibernética, e se refere tanto ao âmbito das inter-relações computacionais em rede como experiências espaciais virtuais. Em seu texto, *The Architectural Relevance of Cyberspace* (FRAZER, 1995a), Frazer homenageia Gordon Pask em referência ao seu artigo de 1969, e afirma que o mundo virtual não é apenas um novo mundo, mas uma nova maneira de ver o mundo físico. O ciberespaço é uma dimensão extra que ganhamos e que nos permite uma nova liberdade de movimento, que extrapola do ciberespaço para o espaço físico.

Se antes habitávamos um universo delimitado pelas formas no espaço, consolidado em produtos, o ciberespaço transformou esse universo em informação, onde as relações têm papel fundamental. Hoje, vivemos um momento onde a concepção do domínio digital não está mais separada do domínio físico, havendo uma interseção entre eles através da integração computacional. O espaço físico vai ao encontro do ciberespaço dando nascimento a uma outra dimensão, o espaço ciber-físico.

Essa integração se reflete nos processos de produção humanos, e hoje já percebemos esse redirecionamento, de processos baseados em instruções, do físico para o digital, ou vice-versa, para processos baseados no comportamento integrado, em retroação contínua. Essa mudança não tem implicações apenas no processo de materialização, mas na concepção do design que passa a ser integrado à

97 Frazer foi um dos pioneiros da tecnologia na arquitetura, trabalhando com Julia Frazer no famoso projeto de Cedric Price, *The Generator* (1976-79). Realizou grande contribuição com sua abordagem evolucionária da arquitetura. Ver FRAZER, J. *An Evolutionary Architecture*. Londres: Architectural Association publications, 1995. <http://www.interactivearchitecture.org/the-generator-project.html>



sua materialização através de fluxos de informação. A Indústria 4.0 traz uma grande mudança de paradigma com a implementação de sistemas ciber-físicos de produção. O termo sistemas ciber-físicos (*CPS - cyber-physical systems*) foi cunhado em 2006, se referindo à integração da computação em processos físicos de produção industrial. Em sistemas ciber-físicos, computadores em rede integrada monitoram e controlam os processos físicos de produção, com *loops de feedback* onde os processos físicos afetam os cálculos e vice-versa. O design de tais sistemas de alta complexidade demanda a compreensão da dinâmica conjunta de computadores, softwares, redes e processos físicos, um cruzamento de diversas disciplinas (LEE, 2011). Tais sistemas operam no espaço ciber-físico, local de interseção, não de união, entre o físico e o computacional. Para entender essa nova relação entre dimensões, é preciso apreender suas interações.

Imagem 40: As Revoluções Industriais.
Fonte: MENGES, 2015b, p.30.

Em pouco tempo, dois séculos, experimentamos grandes transformações tecnológicas condensadas, uma rápida transformação que demanda adaptatividade e resiliência. A Primeira Revolução Industrial⁹⁸ (Imagem 40) resultante da mecanização de processos foi o primeiro passo em direção à automação de processos manuais. Na Segunda Revolução Industrial a eletricidade tornou possível o estabelecimento das linhas de produção assim como a fabricação em massa de produtos padronizados. Com o avanço na capacidade de programar os

98 Outro modo de classificar as transformações humanas indo além da industrialização emprega um ponto de vista econômico baseado no poder, que divide a história em 4 eras: Era Agrícola, Era Industrial, Era da Informação, e a quarta permanece em aberto por se tratar do século que se inicia, mas muitos apontam para a Era Conceitual, das Redes ou das Comunidades. Esse modelo é baseado na moeda de poder de cada período, sendo estas terra, capital, conhecimento, e criatividade, alianças ou pessoas, dependendo do enfoque. Esse modelo foi desenvolvido pelo futurista e empresário americano Alvin Toffler https://pt.wikipedia.org/wiki/Alvin_Toffler ; Outro futurista americano, Raymond Kurzweil, afirma em seu livro *The Singularity Is Near* (2005) que estamos passando por 3 revoluções simultâneas: Genética/Biotecnologia, Nanotecnologia e Robótica/Inteligência Artificial. <https://singularityhub.com/2016/04/19/ray-kurzweil-predicts-three-technologies-will-define-our-future/#sm.000004ner7lui8eddzy-6d2zqhny4n>

dispositivos elétricos, a produção da Terceira Revolução Industrial se tornou altamente automatizada com certo grau de flexibilização programável. Foi nessa época que se estabeleceu a cadeia CAx de produção (CAD, CAE e CAM)⁹⁹, e a grande maioria das máquinas de fabricação ainda eram específicas para uma determinada função. A Quarta Revolução Industrial veio para integrar o domínio físico e o virtual, através da crescente capacidade das máquinas e robôs de monitorar, sentir e comunicar entre esses dois domínios. As máquinas que ganharam capacidade de aprendizado estão ganhando autonomia, quando passam a prever, configurar e se auto-organizar. Segundo Menges (2015b, p. 31), a revolução que vivemos agora difere das outras, pois não tem como objetivo último e único aumentar a produtividade industrial, mas diversificá-la, implementando flexibilidade, adaptabilidade e integração. E por isso mesmo seu impacto no design de arquitetura será bem maior. É questão de uma ou duas décadas para a realidade da produção industrial se transformar radicalmente, tendo a Alemanha como principal impulsionadora, e cabe a nós pegarmos o bonde agora, ou pelo menos tomar consciência dele, ou continuaremos a ser apenas observadores, sem nem ao menos ter domínio crítico sobre o presente.

Menges, em seu artigo *The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction* (2015b), retoma a diferenciação entre design informatizado e design computacional (*computerised* e *computational*), pois agora, essa questão não só se aplica ao âmbito do design, mas também ao processo de fabricação que passa a ser computacional. Se antes houve um clamor pela conscientização dos processos de design de sua capacidade computacional, agora é a vez da fabricação também explorar plenamente essa capacidade adquirida. O fluxo de informações bem definidas sobre o design para a fabricação passa agora a correr em retroação, informando um ao outro, em um processo exploratório de design. Além dessa capacidade dos sistemas ciber-físico de produção, de conectar o âmbito físico da fabricação com o domínio virtual da computação, através da capacidade de processamento de *big data*, esses sistemas não apenas comportam muita informação, mas diferentes tipos de informações, processadas de formas também diferentes.

Ao ICD - Institute for Computational Design and Construction, de Achim Menges, interessam esses novos processos exploratórios de design computacional com o emprego do robô para extrapolação de limites. Essas transformações do processo de design e de produção têm implicação principalmente na materialidade da arquitetura e no papel que o material desempenha dentro do processo de criação, trazendo ao debate a consciência material. Se para a indústria essas tecnologias sensíveis estão primeiro sendo aplicadas para reduzir as tolerâncias

99 CAD - Desenho Assistido por Computador (*Computer-Aided Design*), CAE - Engenharia Assistida por Computador (*Computer-Aided Engineering*), e CAM - Manufatura Assistida por Computador (*Computer-Aided Manufacture*).

do processo de fabricação a níveis ainda menores, aprimorando a precisão, no design um de seus potenciais é permitir a produção baseada no comportamento, um uso generativo baseado no material.

“Computation is emerging as a key interface for material exploration, enabling engagement with aspects of the material world that until recently were too far removed from the modalities of designers sense and intuition. This represents a significant perceptual shift in which the materiality of architecture is no longer seen as a fixed property and passive receptor of digitally derived form, but is transformed into an active generator of design and an adaptive agent of architectural performance. Similarly, and in stark contrast to previous linear and mechanistic modes of digital fabrication and manufacturing, materialization is now starting to coexist with design in the form of explorative cyber-physical processes.” (MENGES, 2015b. p. 9)¹⁰⁰

Essa exploração material permite acessar novas capacidades que estavam ali presentes na matéria, mas não podiam ser acessadas, ou eram intencionalmente suprimidas em favor da padronização, como no caso da madeira processada que busca uniformizar suas características intrínsecas. Durante a fase de design, esses processos ciber-físicos permitem que informações materiais globais e locais influam diretamente na geração do design, computando suas qualidades físicas e condições construtivas. Testes no mundo físico realimentam de informações os modelos computacionais em retroação. Enquanto no processo de fabricação a resposta em tempo real da condição material da construção, permite informar o modelo que tem seu design constantemente ajustado. Menges ilustra uma das possibilidades de exploração desse espaço ciber-físico em seu projeto em conjunto com o ITKE, o ICD/ITKE Research Pavilion 2014–15 (Imagem 41). Nele, a deposição de fibra de carbono sobre superfície pneumática¹⁰¹ utiliza sensores em tempo real para controlar as condições de fabricação, conectando o design computacional à materialização. Nesse tipo de produção baseada em comportamento os dados são continuamente coletados e alimentados de volta ao sistema, permitindo que o design evolua enquanto é produzido, realiando correções e ajustes no caminho da ferramenta¹⁰². Assim, a materialização se torna um agente ativo

100 “A computação está emergindo como uma interface-chave para a exploração material, permitindo o envolvimento com aspectos do mundo material que até recentemente estavam muito longe das modalidades de senso e intuição dos designers. Isto representa uma mudança de percepção significativa na qual a materialidade da arquitetura não é mais vista como uma propriedade fixa e um receptor passivo de forma derivada digitalmente, mas é transformada em um gerador ativo de design e um agente adaptativo de desempenho arquitetônico. Da mesma forma, e em contraste com os modos lineares e mecanicistas anteriores de fabricação digital e manufatura, a materialização está agora começando a coexistir com o design na forma de processos ciber-físicos exploratórios.” Tradução da autora.

101 Estrutura inflável suportada pelo ar.

102 Caminho da ferramenta (*toolpath*): Percurso da ferramenta gerado para um braço robótico de seis eixos. Tradicionalmente o caminho da ferramenta do robô é ensinado ou pro-

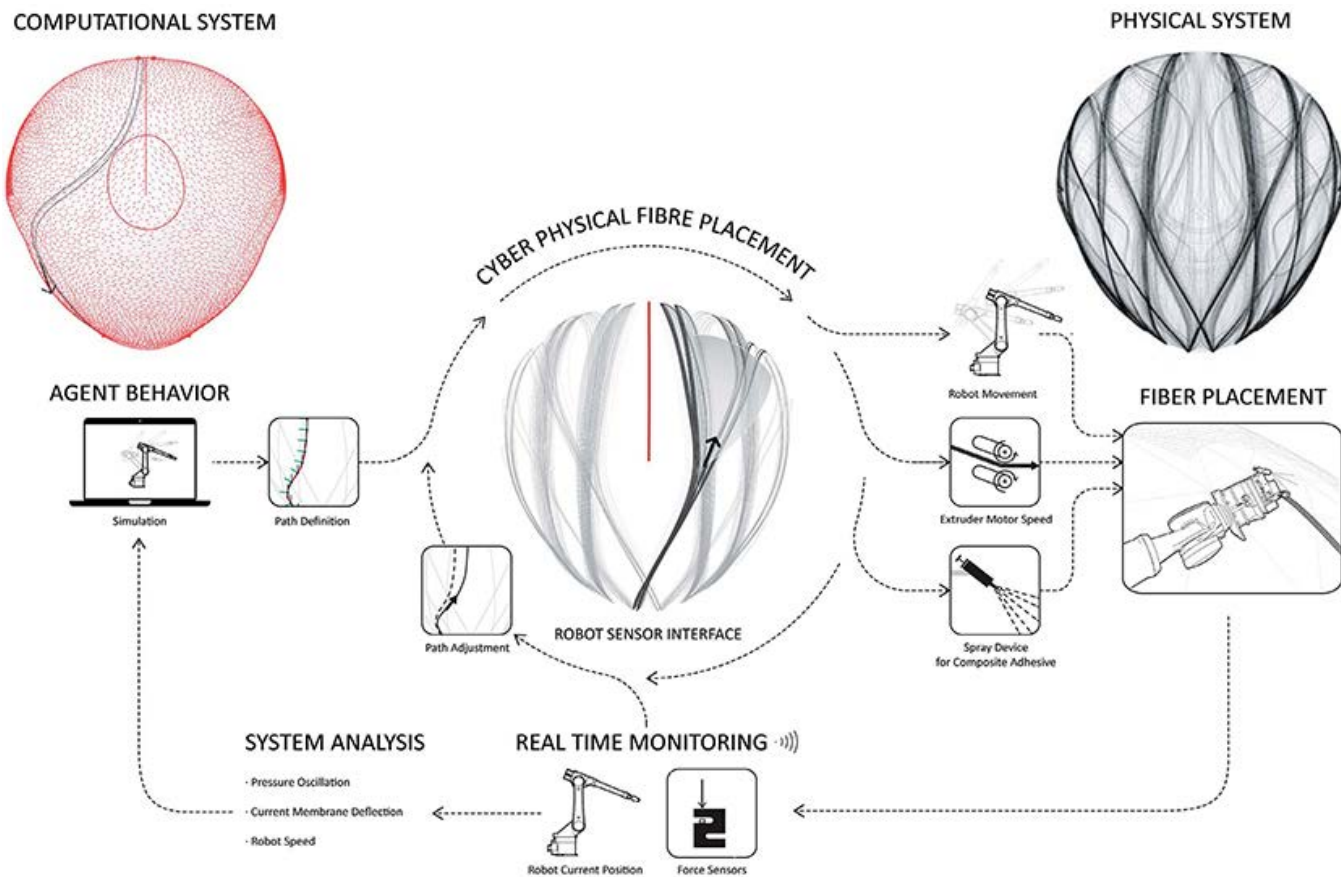


Imagem 41: Sistema ciber-físico de produção do ICD/ITKE Research Pavilion 2014–15. Fonte: ICD

no design “não só pela antecipação de seus recursos e restrições no domínio virtual do design computacional, mas também por sua extensão à computação física da forma, estrutura e espaço durante o desdobramento de sua produção.” (MENGES, 2015b, p. 32).

A questão chave dos sistemas ciber-físicos é justamente o agenciamento de interfaces, pois aí reside o conhecimento, nas articulações, na arquitetura da rede. Segundo Lévy (1990), filósofo tunisiano grande contribuidor à cibercultura, considera interface o estabelecimento de contato entre meios heterogêneos, operações de tradução quando nada fala a mesma língua ou segue a mesma norma. É no ultrapassar de discontinuidades que reside a maestria do processo.

“O método de análise em redes de interfaces revela coletivos heterogêneos abertos a novas conexões, redes interligadas e dispersas ao sabor de dinâmicas ecológicas. Ela permite dissolver as substâncias, as definições instáveis e as pretensas determinações para devolver os seres e as coisas à fluidez do devir. A seu devir social, questão de lutas e de projetos, mas também a seu possível devir estético ou existencial.” (LÉVY, 1990, p. 186)

gramado manualmente. O acoplamento robótico com visão de máquina e sensoriamento permite que os caminhos da ferramenta sejam desprogramados e direcionados em resposta às questões materiais, fatores ambientais ou outras questões não-computáveis (*contigent computing*) (TESTA, 2017, p. 297).

Em relação ao resgate da natureza como inspiração morfo-genética, e ao design informado pela materialidade, possíveis pelas interfaces computacionais construídas, vale lembrar que em todo processo de tradução inserimos o observador no objeto observado. Permitimo-lo ser apenas aquilo que imaginamos. A natureza resgatada ao processo de design é a natureza senão submetida às nossas concepções e projeções, e nesse exato ponto reside a inflexão que nos permitirá ir além da matéria.

“(…) desde un principio nos hallamos imbricados en la contraposición entre hombre y Naturaleza, y la ciencia es precisamente una manifestación parcial de dicho dualismo. Las vulgares divisiones del Universo en sujeto y objeto, mundo interior y mundo exterior, cuerpo y alma, no sirven ya más que para suscitar equívocos. De modo que en la ciencia el objeto de la investigación no es la Naturaleza en sí misma, sino la Naturaleza sometida a la interrogación de los hombres; con lo cual, también en este dominio, el hombre se encuentra enfrentado a sí mismo.” (HEISENBERG , 1955, p. 21)^{103 104}

Vemos os domínios físico e virtual caminharem um de encontro ao outro. Enquanto a materialização se torna computacional e generativa, o design retoma sua fisicalidade baseada na materialidade, para quem sabe, em um futuro não muito distante, seus limites se confundam em um processo de fusão. Por enquanto, Menges aponta (2015b), esse processo desafia não só as nossas atuais técnicas de design e produção como, e principalmente, o pensamento de design consolidado. As tecnologias ciber-físicas emergentes não tratam apenas de explorações formais, mas de intrincadas relações entre espaço, estrutura, ecologia e dinâmicas sociais, responsáveis por moldar nossa cultura material do futuro. Para Gramazio e Kohler (GRAMAZIO e KOHLER, 2014b) devemos adicionar ao caldo o robô não apenas como meio de produção, mas através de uma abordagem epistemológica da arquitetura computacional, como parte integrante de uma nova cultura tecnológica. Através dessa perspectiva mais ampla e profunda será possível conectar inteiramente a robótica à arquitetura.

Ao alargarmos os limites da disciplina para mais além, transbordando para outros campos do conhecimento, não buscamos apenas

103 “(…) desde o princípio estamos imbricados na contraposição entre homem e Natureza, e a ciência é precisamente uma manifestação parcial desse dualismo. As divisões vulgares do Universo em sujeito e objeto, mundo interior e mundo exterior, corpo e alma, não servem mais do que despertar equívocos. De modo que, na ciência, o objeto de investigação não é a Natureza mesma, mas a Natureza submetida à interrogação dos homens; com o qual, também neste domínio, o homem se vê confrontado consigo mesmo.” Tradução da autora.

104 Físico quântico ganhador do Prêmio Nobel em 1932. Formulou o princípio da incerteza em 1927, que abalou a ideia de realidade newtoniana de entidades concretas de existência independente. O princípio da incerteza nos revela um panorama de possibilidades trazidas à tona pela ação de um observador. O fenômeno que emerge está condicionado ao que o faz emergir, revelando a natureza interdependente e composta dos fenômenos (BAKER, 2015).

a complexidade e o aumento de nossa capacidade computacional. Não se trata apenas de conhecimento, mas de buscar a sabedoria através do conhecimento¹⁰⁵. É preciso desenvolver tino e precisão ao nos relacionarmos com a natureza da realidade, pois não se trata de ficção científica, mas da própria engrenagem da história que arreda a todos nós em seu movimento. Por isso, vai além de defender uma postura ou um conceito logicamente bem justificado, mas engloba uma perspectiva maior, que extrapola as questões da ferramenta, do processo e da materialidade do objeto. Essa atitude neutra diante dos fatos que se desenrolam, nem puramente crítica, nem puramente devocional, nos traz aos fatos em si, sem filtros. Ao soltarmos os conceitos pré-estabelecidos podemos tocar essa realidade de forma leve, podemos vivenciar as experiências de maneira lógica e sensivelmente, sem grandes conclusões precipitadas, mas com clareza para onde apontar. Buscar o equilíbrio do caminho do meio¹⁰⁶, sem pender a vertentes extremas¹⁰⁷ e estreitas que nos levam a desvios de rota no nosso próprio processo de evolução como humanos, mais do que arquitetos. Somente assim podemos enfrentar plenamente os desafios que o futuro encerra.

105 A própria ideia que se tem sobre o conhecimento humano está mudando, de uma abordagem dualista que observa o mundo lá fora, o analisa e cria modelos, para um conhecimento incorporado que vê a interdependência e a coevolução entre o fenômeno e o observador. O conhecimento humano conceitualizado passa a ser apenas um universo criado dentro do multiverso. Ver entrevista: Francisco Varela *on science, art and religion*, 1983. <https://www.youtube.com/watch?v=vgZMPcrRmio&feature=youtu.be&t=8m45s>

106 O caminho do meio libera dos extremos condicionados pelo apego ou pela aversão tornando o passo equilibrado e confiante. Não se trata de um caminho cerceado, mas aberto e claro. É como ter os raios de sol direcionados a um ponto focal, ao invés de tê-los dispersos. Essa luz focalizada tem capacidade de distinguir especulações distrativas da real substância de interesse. Em referência à escola filosófica indiana Madhyamika (Caminho do Meio). <http://www.rigpawiki.org/index.php?title=Madhyamika>

107 Muito facilmente o discurso tecnológico aponta para os extremos da tecno-utopia ou do tecno-pessimismo. Ver Picon, 2014b.

3. FABRICAÇÃO ROBÓTICA DE ARQUITETURAS DIGITAIS

Neste capítulo buscamos definir o estado da arte da produção de arquiteturas digitais através do uso do robô ao analisarmos a produção pioneira que vem sendo desenvolvida nos centros de pesquisa avançada da Europa. Através da seleção dos projetos mais significativos realizados até o momento, buscamos compreender os novos processos computacionais desenvolvidos para o design e para a fabricação, entendendo sua relação de reciprocidade. É através da análise dessa produção, e dos seus processos de desenvolvimento, que poderemos identificar e entender a construção do pensamento computacional para cada um desses pesquisadores que lideram esse campo.

Partiremos de uma abordagem panorâmica, primeiro entendendo do que se trata quando falamos do robô e o que o diferencia das demais máquinas de fabricação digital, tornando-o tão excepcional. Revisitaremos as primeiras abordagens robóticas na construção de arquitetura durante a década de 80, para entender onde fracassaram e em que se diferenciam dessa nova onda robótica no campo arquitetônico. Apresentaremos os laboratórios, bem como seus pesquisadores, onde essa nova pesquisa se desenvolve para então passarmos para as obras, e suas diferentes abordagens do design computacional aliado à fabricação robótica. Por fim, chegaremos aos trópicos para semear esses novos conceitos, que ainda inviáveis na prática, mas necessários através da teoria.

3.1 O robô

“A impressão é a de um grande ballet minimalista, silencioso, misterioso. (...) as máquinas parecem examinar o vazio com seus olhos, e os roboticistas se concentram nos monitores de seus computadores, repletos de linhas de programas. Todos, homens e máquinas, parecem fechados em suas próprias esferas.” (PARÉ, 2010, p. 22)

Antes de tudo, é preciso esclarecer a quem nos referimos ao tratar da fabricação robótica. Para tal, recorreremos à definição do termo robô que iremos adotar, apontando suas características únicas que o diferenciam de máquinas CNC, as famosas máquinas de controle numérico. Por serem universais e robustos, os robôs se relacionam com a produção da arquitetura de uma forma inteiramente nova e participativa, tornando esse processo colaborativo entre homem e máquina. Pode-se dizer que, em alguns casos, essa relação se torna simbiótica, uma associação de espécies que se relacionam interdependentemente (COLLETTI, 2013, p. 87). Vamos tentar entender como e por quê.

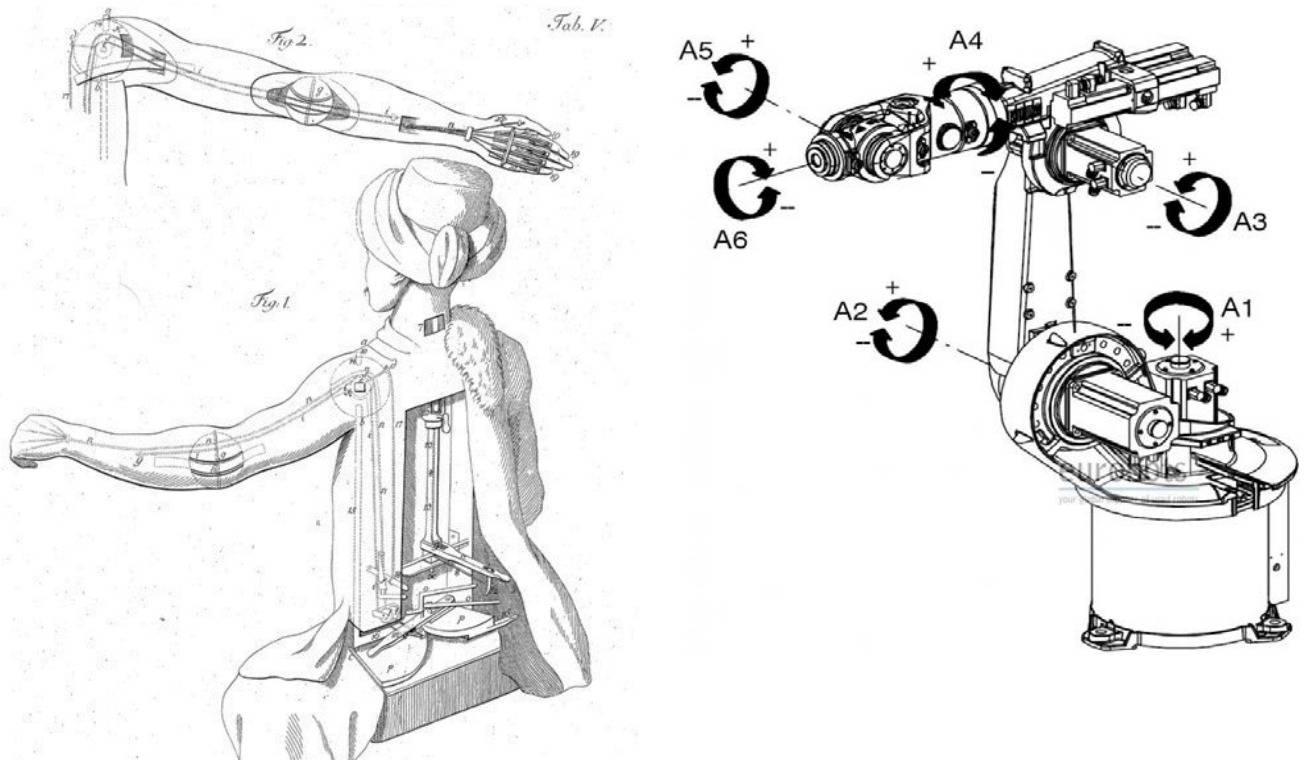
A própria definição de robô vem evoluindo ao longo do tempo, conforme a tecnologia se desenvolve e esse dispositivo adquire novas habilidades. A definição de robô encontrada no dicionário Houaiss da Língua Portuguesa já se demonstra desatualizada em relação aos aspectos do robô a serem tratados aqui, pois incide mais sobre uma era mecanicista que a uma era computacional.

“Ro.bô *s.m.* **1** máquina, geralmente de aspecto humano, capaz de agir e se mover **2** mecanismo comandado eletronicamente, capaz de substituir o homem em certas operações **3** *fig.* pessoa que age mecanicamente ~ robótico *adj.*” (HOUAISS, 2010).

O termo robô tem origem tcheca, vindo da combinação das palavras *rabota*, que significa “trabalho obrigatório” e *robotnik*, que significa “servo”. Foi popularizado por Karel Čapek em sua peça teatral “Rossum’s Universal Robots” em 1921 (MATARIC, 2014, p. 17). Apesar de muitos dos robôs da atualidade estarem realizando trabalhos repetitivos e exaustivos para o homem, como nas linhas de montagem de automóveis, essa definição surgida em uma era pré-digital é muito limitada para o seu potencial atual. No entanto, já em sua origem o autor trata do controle e regulação da informação como características centrais à máquina, e não só cunha o termo como o associa a um contexto cultural de crítica à industrialização. Enquanto em sua origem, o robô é cercado por questões de força de trabalho e de poder, atualmente, em sua implementação na arquitetura vemos uma busca por uma compreensão integrativa da relação entre homem e máquina (GRAMAZIO e KOHLER, 2014a, p.111).

Ainda é comum associarmos a ideia de robô a máquinas e autômatos mecânicos (Imagem 42), os robôs primitivos, mas com os avanços tecnológicos, os robôs passaram a se assemelhar cada vez mais com dispositivos biológicos sendo capazes de processar raciocínio, resolver problemas e desenvolver inteligência através do aprendizado, caminhando em direção à tão esperada singularidade¹⁰⁸. Atualmente, para ser considerado robô, o dispositivo precisa ser um sistema autônomo, que recebe informações da pessoa que o opera, mas não é exatamente controlado por ela, pois atua com base nas suas próprias decisões. Outra questão é que os robôs existem no mundo físico e por isso precisam operar com as dificuldades intrínsecas do mundo material, os robôs precisam “sentir” o mundo que habitam. Essa leitura do ambiente é feita através de seus sensores que extraem informações e que alimentam as suas tomadas de decisões, ou seja, possuem ca-

108 Singularidade é uma hipótese de que a inteligência artificial conseguirá alcançar níveis superiores à inteligência humana. Segundo Gordon Moore, a cada 18 meses a capacidade de processamento dos computadores dobra. Os cálculos levam à previsão de que entre 2025 e 2070 a singularidade será alcançada, embora seja perfeitamente possível que esta demore mais a ocorrer ou, simplesmente, não ocorra. https://pt.wikipedia.org/wiki/Singularidade_tecnol%C3%B3gica



pacidade de resposta e interação. Essa resposta, ou a forma de agir do robô varia enormemente e por isso temos uma gama riquíssima de possibilidades de atuação desses sistemas. A sua atuação vem através de uma intenção, imbuída por quem o constrói e programa. Dessa forma, Mataric define robôs como sistemas autônomos e intencionais, capazes de sentir e agir no mundo (2014, p. 21).

Em sua predominância, iremos tratar aqui do uso do braço robótico de 6 eixos, mais conhecido como robô industrial¹⁰⁹, salvo o projeto The Sequential Roof, que por conta da sua escala de produção, passou para um robô tipo pórtico de 6 eixos. Os eixos se referem às articulações de seu posicionamento no espaço, sendo neste caso, 3 para o braço e 3 para o punho (Imagem 43). Os robôs industriais são robustos e multipropósitos, e sua complexidade varia de acordo com o seu programa de controle e as funções demandadas. Segundo a International Organization for Standardization (ISO) os robôs industriais são definidos como:

“Automatically controlled, reprogrammable, multipurpose manipulator, programmable in three or more axes, which can be either fixed in place or mobile for use in industrial automation applications. The industrial robot includes: the manipulator (including actuators) and the

109 “Robôs industriais têm várias configurações (cartesianas, cilíndricas, polares, revolutas e SCARA são as mais usadas). A maioria dos robôs articulados possui seis eixos, também chamados de seis graus de liberdade, permitindo que o braço se mova para qualquer ponto da área de trabalho ou esfera de trabalho. O robô consiste de duas unidades: o braço robótico e o controlador, um sistema de controle por computador que transmite os sinais de e para o braço robótico. Os robôs de seis eixos permitem maior flexibilidade e podem executar uma ampla gama de aplicações em relação a robôs com menos eixos.” (TESTA, 2017, p. 296)

Imagem 42: The Turk, ilustração do livro de Karl Gottlieb von Windisch, Briefe über den Schachspieler des Hrn. von Kempelen, 1783. Fonte: Wikimedia.

Imagem 43: Diagrama de eixos, modelo KUKA KR15 /2. Fonte: Eurobots.

controller, including tech pendant and any communication interface (hardware and software).” (ISO 8373, 2012).¹¹⁰

Quanto às máquinas de fabricação digital como *router*, cortadoras a laser e impressoras 3D, estas já fazem parte do ferramental das escolas de arquitetura há pelo menos 20 anos. No entanto, apesar de compartilharem com os robôs a qualidade de serem programáveis, existe uma clara limitação em suas capacidades. Primeiro, são uni funcionais, capazes de realizar apenas a tarefa a qual sua engenharia foi desenvolvida. Seus processos de fabricação englobam o corte 2D¹¹¹, e processos aditivos, subtrativos e formativos de geometrias tri-dimensionais, que permitem a fabricação de artefatos não padronizados e a automação da produção (KOLAREVIC, 2005). E o mais importante, não possuem o grau de complexidade interativa que o robô suporta entre o meio físico e digital ao longo de seu processo de fabricação, que pode-se dar em tempo real¹¹². Seu fluxo de informações é de mão-única, indo do projeto digital para a fabricação, através de um arquivo de fabricação produzido a partir do arquivo de projeto. O que em si já é um grande avanço da era digital na relação entre arquiteto e obra, eliminando muitas lacunas existentes entre o desenho no papel e a interpretação do construtor no processo de materialização do projeto. Porém, a característica interativa entre robô e design é tão potente que altera os meios como a arquitetura passa a ser concebida.

Os dispositivos robóticos possuem uma natureza universal, ou seja, são capazes de realizar múltiplas tarefas, pois comportam diferentes ferramentas acopladas à seu punho, os *end-effectors*¹¹³, que podem ser muito específicos ou comuns. Vão desde ferramentas para a manipulação física do material, as mesmas empregadas em máquinas de controle numérico, acrescidas de muitas outras possibilidades, como a aferição de informações, medições e escaneamento, que muitas das vezes são desenvolvidas para o projeto específico. A sua capacidade de programação não se refere apenas ao controle digital de seus movimentos e ações, mas, além disso, a manipulação do material também passa a ser programada através de uma definição do processo físico de

110 “Controlado automaticamente, reprogramável, manipulador multipropósito, programável em três ou mais eixos, que pode ser fixo ou móvel para uso em aplicações de automação industrial. O robô industrial inclui: o manipulador (incluindo atuadores) e o controlador, incluindo tecnologia pendente e qualquer interface de comunicação (*hardware* e *software*).” Tradução da autora.

111 Na fabricação da Casa Revista - LAMO (2015) o processo utilizado foi o de corte 2D utilizando uma *router* de 3 eixos para usinar as chapas de madeira compensada.

112 O modelo de controle em tempo real implica que o robô reage diretamente a entradas externas e permite que processos materiais, projeções de vídeo, som e o movimentos do robô sejam sincronizados. O robô é equipado com um sistema de controle interativo que permite reagir aos comandos enquanto a programação roda, sem a necessidade de pará-la. (TESTA, 2017, p. 297)

113 “O dispositivo no final de um braço robótico, projetado para interagir com materiais e o meio ambiente. Sensores e atuadores podem ser incorporados ao ferramental para suportar modalidades quase autônomas de *feedback* e *feedforward*.” (TESTA, 2017, p. 296). Tradução da autora.

fabricação. O processo de fabricação passa a ser específico ao projeto, e por isso se torna parte do processo geral de projeto e, conseqüentemente, influi no processo de design. (BONWETSCH, 2015, p. 6).

Outra característica importante nessa distinção é sua capacidade de realizar tarefas de montagem, ou seja, podem ser empregados diretamente no processo de construção. Ao contrário das máquinas CNC que são voltadas apenas para a produção de componentes, enquanto seus processos de montagem ficam a cargo das condições humanas e máquinicas do canteiro. Isso se deve à própria origem desses dispositivos, onde os primeiros foram concebidos para o manuseio de peças nas linhas de montagem, substituindo o trabalho humano, e por isso mesmo sua estrutura física mimetiza o braço humano. Já as máquinas CNC, foram desenvolvidas para substituir máquinas, com capacidade de automação de processos, e seu uso para produção de peças diferenciadas torna o processo de montagem um verdadeiro desafio de acordo com a quantidade e variabilidade dessas peças (BONWETSCH, 2015, p. 6). A gama de robôs industriais disponíveis engloba desde robôs de bancada a largos dispositivos acoplados a trilho, ou até mesmo sobre chassi de esteira, permitindo que o robô vá até o local de construção. Processos de montagem complexas e o desenvolvimento e aplicação de uma profusão de acessórios passou a fazer parte do escopo do projeto integrado à fabricação. Para Gramazio e Kohler (2014a), o verdadeiro potencial desse cruzamento entre arquitetura e robótica é correlacionar a natureza flexível e genérica do robô às condições específicas para a produção de uma arquitetura expressiva, para além da construção. No entanto, essa não foi a abordagem inicial no diálogo entre esses dois campos durante a década de 80, e talvez esse seja um dos motivos de seu fracasso, como veremos a seguir.

3.2 A produção robótica da arquitetura

“Every new (production) medium is first applied in the same way as the previous one, before the technology’s actual inherent potentials find expression.” (GRAMAZIO e KOHLER, 2014a, p. 105).¹¹⁴

Se em um primeiro momento, no final da década de 70, a robótica aplicada à produção arquitetônica tinha como foco o aumento da produtividade e a automatização de processos, vemos a retomada dessa iniciativa através de outra abordagem a partir dos anos 2000. Apresentaremos aqui essa breve história que contribuiu para o contexto e o estado da arte atual do robô na arquitetura.

114 “Todo novo meio (de produção) é primeiro aplicado da mesma forma que o anterior, antes que os reais potenciais inerentes da tecnologia encontrem expressão.” Tradução da autora. Os autores se referem às ideias de McLuhan em seu livro *Understanding Media: The extensions of man* (1974).

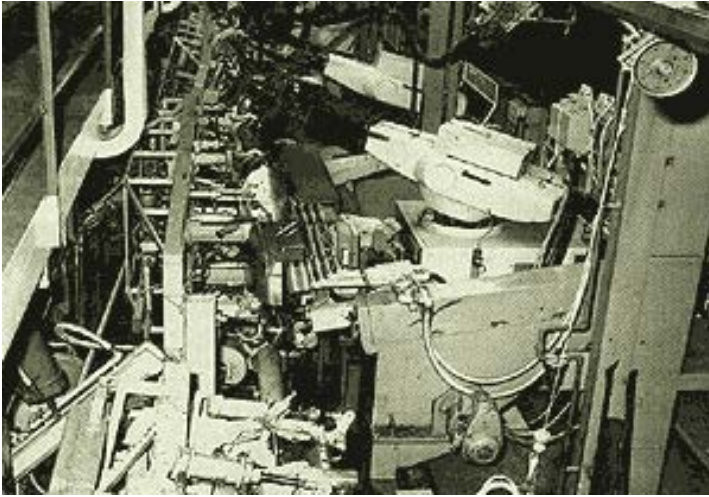


Imagem 44: Linha de soldagem com robôs Unimate, 1971. Fonte: International Federation of Robotics.

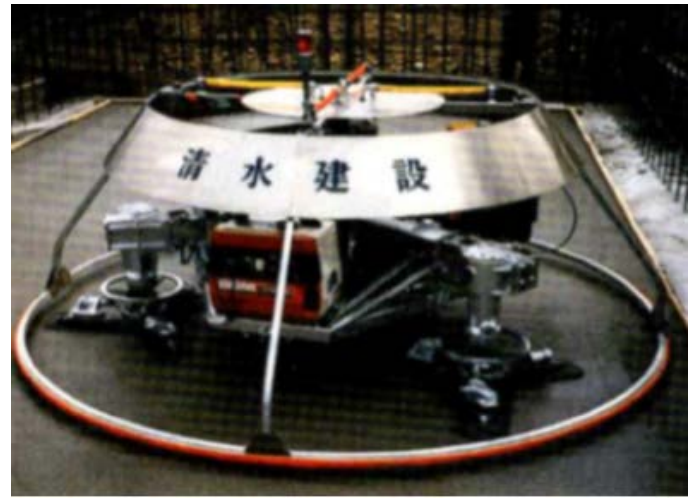
Imagem 45: KUKA Famulus, 1973. Fonte: International Federation of Robotics.

Ainda durante os anos 50 foi desenvolvido no MIT um sistema de controle numérico computadorizado (CNC). Tratava-se de um computador de tubo de vácuo conectado a uma máquina de fresagem controlada por um mecanismo de servo motor. E como muitos dos processos de fabricação CNC funcionam até hoje, esse mecanismo recebia uma série de instruções abstratas para a fabricação, totalmente desconectadas do processo de design ou do material. Os mecanismos antropomorfos datam de bem antes com os automatatas, mas o pleno desenvolvimento de braços robóticos para a manufatura começa a se dar na década de 60 (KILIAN, 2017a, xxi).

A primeira patente de um robô industrial é atribuída a George Devol em 1954, que o denomina Universal Automotion, ou Unimation, em referência tanto ao conceito da Máquina Universal de Turing, como aos computadores universais que começavam a ser comercializados e incorporados aos escritórios na época (BONWETSCH, 2015, p. 14). A partir da década de 60 esses robôs começaram a ocupar linhas de produção fabris realizando tarefas perigosas como fundição e soldagem de metais (Imagem 44). O braço robótico como o conhecemos hoje, com 6 eixos articulados eletromecanicamente, começaram a surgir na década de 70, e em 1973 a KUKA apresentou seu modelo Famulus (Imagem 45). Durante a década de 80 houve grande expansão da manufatura automatizada por robôs, principalmente na indústria automobilística e eletrônica. Foi também nessa década que foram introduzidos os robôs industriais de larga escala em pórtico (*gantry robots*) e a tecnologia de visão da máquina¹¹⁵ (*machine vision*) foi desenvolvida. Na década de 90, sistemas de controle de movimento¹¹⁶ foram aprimorados surgindo

115 “Visão da máquina: Tecnologia e métodos que permitem que um computador ou robô “veja” usando imagens 2D ou 3D e processamento de sinais digitais. Depois que uma imagem é adquirida, ela é processada. Uma variedade de métodos de processamento de imagens inclui costura/registro, filtragem, segmentação, detecção de bordas, análise de cores, reconhecimento de padrões e metrologia ou medição.” (TESTA, 2017, p. 296). Tradução da autora.

116 “Controle de movimento: A posição e a velocidade dos manipuladores robóticos são controladas por servo motores elétricos. A interface entre o controlador de movimento e o robô deve fornecer uma sincronização coerente. Funções de controle incluem velocidade, posição, pressão e impedância.” (TESTA, 2017, p. 297). Tradução da autora.



dispositivos de controle remotos, bem como sistemas para manipular robôs sincrônicos¹¹⁷ (*synchronous robotics*) (em 2009, sua capacidade de sincronia atingiu 8 robôs, somando 72 eixos). Em 2006 a Kuka apresentou seu modelo de robô leve, Light Weight Robot, com apenas 16 kg e capacidade de 7kg de carga. E em 2007, a mesma empresa alemã lançou em seu extremo oposto, um modelo de braço robótico de longo alcance capaz de suportar cargas de até 1.3 toneladas, o KR 1000 Titan, com suas 4.7 toneladas. (Imagem 46) (International Federation of Robotics)¹¹⁸. Ao longo desses anos, a tecnologia foi evoluindo em direção a um maior controle de velocidade, precisão e capacidade de carga, os robôs ganharam diversas configurações cinéticas, e muitos tipos de sensores foram acoplados na melhoria da inteligência da máquina. Outra questão chave para essa melhoria da interação robótica com o homem e o meio, foi a inserção do controlador humano no loop de controle (BONWETSCH, 2015).

Imagem 46: KUKA Titan, 2007. Fonte: International Federation of Robotics.

Imagem 47: FLATKN da Shimizu Corporation. O robô realiza acabamento em lajes de concreto. Fonte: BONWETSCH, 2015.

A história entre robótica e construção arquitetônica começa em 1978 no Japão, quando foram desenvolvidos diversos modelos de robôs para a automação de processos construtivos. Durante a década de 80, a indústria da construção no Japão encontrava-se aquecida e carente de mão de obra, um cenário propício para a aplicação dessa tecnologia na substituição do trabalho humano em canteiro. No entanto, a grande logística e infraestrutura necessária para operar esses dispositivos em canteiros de obra, em uma época em que a tecnologia ainda se desenvolvia, contribuiu para sua descontinuação (CAMPOS, 2016). Tratava-se de dispositivos altamente especializados, voltados unicamente para a automação e aumento da produtividade, de difícil

117 “A robótica síncrona implica que os robôs devem estar cientes um do outro e devem trabalhar de alguma forma que depende um do(s) outro(s). Assíncrono significa que eles são totalmente independentes e nenhum deve considerar o outro nem na iniciação ou na execução da programação. A robótica síncrona de múltiplos braços oferece rede e controle distribuído, e coreografia de seqüências de movimentos síncronos e assíncronos. Esses sistemas são muito mais complexos do que robôs industriais únicos, de tarefas específicas e pré-programados. Os sistemas síncronos se estendem e possibilitam uma ampla gama de interações entre sistemas robóticos, com processos materiais e colaboração com usuários humanos.” (TESTA, 2017, p. 297). Tradução da autora.

118 <https://ifr.org/robot-history>



Imagem 48: Máquina K2 de 5 eixos para processamento e produção de encaixes de madeira. Fonte: Hundegger.

mobilidade e controle limitado (Imagem 47). Montagem de equipamentos, distribuição de materiais, soldagem de estruturas de aço, pintura, assentamento de revestimentos foram algumas das tarefas que desempenharam. Mas por serem rígidos em sua operativa, e de alto custo operacional, fracassaram tanto financeiramente como arquitetonicamente. Como Martin Bechthold (2010), professor em Harvard, afirma “o mundo não estava preparado para a construção robótica”. A tentativa também se expandiu sem grande sucesso para a Europa na virada do século, ainda com premissas da industrialização de produção em massa e padronização de componentes para montagem, visando o aumento da produtividade, qualidade, segurança e principalmente, a redução de custos da construção (BONWETSCH, 2015).

A automação digital foi bem sucedida ao ser implementada em diversos setores da indústria, como a automotiva, implementando novos padrões de qualidade e produtividade extremamente elevados. Acontece que no setor da construção, a mesma lógica de produção em massa não pode ser aplicada, pois assim, muitas questões da arquitetura são omitidas em favor da otimização de processos e redução de custos. O design se torna limitado e é simplificado para se adequar aos processos de produção. No entanto, há um setor que se tornou exceção e se desenvolveu, o de estruturas de madeira que contam com máquinas de 5 eixos para a automatização e fabricação precisa de suas junções (*joinery machines*) (Imagem 48) (GRAMAZIO e KOHLER, 2014a).

Mais de 20 anos depois, a fabricação robótica da arquitetura se engaja menos na otimização de processos e mais na exploração de desenho, ou melhor, é justamente dirigida pelo design utilizando dispositivos antropomorfos, os braços robóticos industriais de uso universal (BECHTHOLD, 2014, p. 293). Estes dispositivos vêm transformar os conceitos de fabricação digital na arquitetura, o que Bechthold chama de design robótico (*design robotics*) direcionado para a inovação. Segundo ele, através da computação há uma aproximação entre inputs digitais e outputs robóticos permitindo que questões físicas e materi-

ais refletem mais rapidamente na exploração do design. O processo exploratório centrado no design representa um avanço significativo em direção de novas maneiras hibridizadas de projetar, fundindo o digital e o físico (2014, p. 296). Segundo Gramazio e Kohler, o que está em curso é um desenvolvimento compreensivo integral da prática arquitetônica, onde a união cada vez mais próxima de projeto e construção, através de processos digitais, abre oportunidades inteiramente novas para a materialização da arquitetura. E somente através do uso do robô de modo imparcial e amplo, o libera para a exploração de sua relevância e verdadeiro potencial conceitual para a arquitetura (GRAMAZIO e KOHLER, 2014a, p. 383).

No entanto, grandes desafios ainda existem na consolidação da fabricação robótica de arquiteturas digitais, e são principalmente relacionados ao software, não ao hardware. Na indústria automobilística, por exemplo, seus processos altamente automatizados são repetidos à exaustão, e o tempo gasto na programação de robôs é dissolvido no volume de sua produção. Por outro lado, a programação de robôs para a construção customizada é bem específica e direcionada para uma pequena produção, tornando necessário o desenvolvimento de sistemas de programação mais eficientes (BECHTHOLD, 2010, p. 121).

Em 2005, o Instituto Federal de Tecnologia de Zurique – ETH Zürich, na Suíça, foi a primeira universidade a estabelecer um laboratório de pesquisa equipado com braços robóticos industriais para a investigação das suas funcionalidades aplicadas à arquitetura. Suas premissas eram totalmente diferentes das iniciativas anteriores do setor construtivo, e por isso é importante objeto de estudo nesta pesquisa. Comandado pelo grupo Gramazio Kohler Research, e instalado em um período de intenso debate sobre a diferenciação do design através dos processos digitais, seu enfoque foi exploratório buscando expressão arquitetônica através da complexidade digital, tanto no processo de design, sua fabricação e montagem. A partir daí, diversos outros centros de pesquisa em arquitetura foram equipados com robôs industriais, como Vienna University of Technology (Áustria) e Yale University (USA) em 2006, Harvard Graduate School of Design (USA) e Royal Melbourne Institute of Technology em 2007. Em 2010 surgiu o Institute of Computational Design and Construction - ICD na University of Stuttgart (Alemanha), outro laboratório importante na nossa pesquisa, por sua contribuição significativa no campo disciplinar.

A arquitetura não ficará imune às mudanças estruturais induzidas pela tecnologia robótica (GRAMAZIO e KOHLER, 2014a), onde relações de reciprocidade entre tecnologia robótica e a realidade material da arquitetura estão sendo construídas. Segundo a dupla que conduz as pesquisas na ETH Zürich, Gramazio e Kohler, a síntese entre esses domínios anteriormente separados irá dissolver as dicotomias entre maquínico e manual, digital e físico, e dinâmico e estático. Essa síntese levará ao confronto das novas tecnologias através da

substância da arquitetura, para a inserção cultural do robô na disciplina.

As muitas dificuldades do processo de implementação da robótica na produção de arquiteturas ainda mostram um campo a ser construído, tendo sua maior expressividade atualmente em canteiros experimentais dentro de centros de pesquisa avançada pelo mundo, mas já se apresentando no mercado da construção diferenciada. O panorama dessa produção pode ser visto através das publicações do FABRICATE, conferência trienal que vem ocorrendo desde 2011 reunindo pesquisadores e empresas. Em sua primeira edição em 2011, a preocupação ainda era a materialização da arquitetura digital, com o tema *Making Digital Architecture*. Em 2014 *Negotiating Design and Making* revelou uma maior interação entre projeto e fabricação, um informando sobre o outro. Em 2017, o tema da conferência, *Rethinking Design and Construction*, propôs repensar a prática como vem sendo desenvolvida, um momento de reflexão para olhar o que já foi produzido, selecionar as questões relevantes, avaliar as lacunas e direcionar a prática futura.

Comparativamente, a última edição apresentou menos pavilhões que as edições anteriores, demonstrando um amadurecimento da experimentação inicial em direção a construções habitáveis em escalas consideráveis. Esses projetos, falam mais do genérico e do poder de alto impacto do que do projeto específico e seus limitantes, indicando uma consolidação de processos interdisciplinares. Segundo o casal Burry (MENGES et al., 2017b, p. 8), a identificação dessa evolução atesta “uma mudança sísmica” na produção arquitetônica com uma notável expansão no campo dos jogadores, intensificando a interdisciplinaridade necessária para a realização de arquiteturas complexas, indo além da mera aceleração de processos e de sua sofisticação.

Nosso foco aqui se limita aos centros acadêmicos de pesquisa avançada que possuem maior expressão nesse campo, tanto pelo pioneirismo como pela experimentação e consolidação de processos. Entendemos que estes centros de pesquisa estão construindo agora as perspectivas de futuro da arquitetura através de sua produção e da expansão da atuação do ser humano através do uso do robô. São eles responsáveis por alargar o campo da disciplina através da combinação de novas áreas do conhecimento aplicado, e por isso conhecer seus vetores direcionadores é fundamental. Começamos então pelos espaços onde essa pesquisa se desenvolve e a infraestrutura necessária para tal. Em seguida, passamos a seus pesquisadores e projetos selecionados que serão analisados em profundidade com o objetivo de compreender e desmistificar esses novos processos de concepção do design e de sua fabricação.

3.3 A pesquisa avançada

“O que sentimos no laboratório é um pouco o que podemos sentir em relação a um módulo espacial vazio, em que repentinamente um copo plástico deixado sobre uma mesa, ou mesmo um braço articulado robotizado, nos faria pensar nos humanos que teriam deixado a nave. Há uma parte de fantasmas nos objetos. Em um laboratório de robótica onde as máquinas são abundantes, os fantasmas parecem se multiplicar ainda mais. Por vezes, parece que os robôs são habitados por fantasmas: os movimentos os ocupam silenciosamente.” (PARÉ, 2010, p. 30)

A implantação de unidades robóticas no centro de pesquisa da ETH Zürich, em 2005, foi seguida por outros centros de pesquisa na América Anglo-Saxônica, Oceania e Ásia. Os robôs só chegaram às universidades latino-americanas em 2013, com dois centros de pesquisa no Chile, e ainda não existem na África. Hoje, são cerca de 88 centros de pesquisa e de fabricação no mundo utilizando robôs na área criativa (Association for Robots in Architecture).

O panorama geral da produção científica desses centros de pesquisa é de muita experimentação de técnicas e processos divulgados através de artigos científicos, com seus resultados e inquietações. Porém, quando se trata de consolidação de métodos e produção de pensamento crítico sobre o fazer esse recorte diminui radicalmente, encontrando maior expressividade nos dois grupos aqui apresentados. A sua intensa produção não só expande o leque de possibilidades do design computacional e da fabricação robótica como quebra paradigmas importantes da disciplina. Iremos aqui seus laboratórios e a infraestrutura de suporte com a qual contam.

Os pioneiros no uso do robô para fabricação de arquiteturas digitais, o grupo **Gramazio Kohler Research**, associado ao Instituto

Imagem 49: Célula de fabricação com KUKA sobre trilhos durante a execução do trabalho TailorCrete, 2013. Fonte: Gramazio Kohler Research.





Imagem 50: Unidade móvel de fabricação R-O-B. Fonte: Gramazio Kohler Research.
Imagem 51: Robotic Prototyping Laboratory. Fonte: Gramazio Kohler Research.



Federal de Tecnologia de Zurique – ETH Zürich, têm foco específico em técnicas aditivas de fabricação digital usadas para a construção de componentes arquitetônicos não padronizados. Isso envolve diversos sistemas construtivos como o tijolo, estruturas espaciais de madeira e aço, a prototipagens com materiais mais fluidos solidificados durante a impressão. Seu objetivo é desenvolver critérios para um novo sistema de lógica estrutural que possa ser aplicado à arquitetura e que seja intrínseco à fabricação digital (Gramazio Kohler Research). Foi a partir de suas experimentações práticas que o grupo cunhou o termo materialidade digital (*digital materiality*), se referindo à nova expressão arquitetônica resultante da interação entre processos digitais e materiais do design e na construção (GRAMAZIO e KOHLER, 2008a). A possibilidade de fabricar diretamente componentes de construção descritos no computador expande não só o espectro de possibilidades de construção, mas, através da implementação direta do material e da lógica de produção no processo de design, estabelece uma nova estética da materialidade digital, informada pelo físico.

Sua infraestrutura começou com um uma célula de fabricação equipada com um KUKA KR150 L110 sobre trilhos de 7m, complementada por mesa giratória e mesa de mudança automática de ferramenta (Imagem 49). Em 2008, o R-O-B tornou possível levar o robô até o canteiro de construção, dentro de um container, um KUKA KR150 L110 sobre trilhos de 5m (Imagem 50). Em 2011 o Robotic Prototyping Laboratory (Imagem 51). foi implementado com 3 Universal Robot UR5, montados em bancada. Hoje em dia são 6 desses robôs e 3 maiores UR10. O In Situ Robotic Fabrication Unit, um ABB IRB 4600 montado sobre chassi de esteira e equipado de sensores espaciais utilizado entre 2011 e 2012 evoluiu para uma versão com câmera, que além de se localizar no espaço e localizar o objeto de trabalho, consegue medir e computar as irregularidades do material no momento da montagem (Imagem 52). Além das máquinas, em 2014, apresentavam 36 *end effectors* diferentes, as ferramentas acopladas ao punho do robô, desenvolvidos especialmente para seus experimentos (GRAMAZIO e KOHLER, 2014a, p. 466-483). Contam também com uma Zwick 1484 para realização de testes com cargas de compressão, duas impressoras



3D FDM (Fused Deposition Modeling) BQ Hephestos 2, e uma impressora de partículas (areia) Voxel Jet. Além disso, possui uma unidade em Singapura estabelecida em 2012, o Singapore-ETH Centre, equipado com 3 Universal Robots UR5 instalados em trilhos verticais, associado ao Future Cities Laboratory, que direciona sua pesquisa às cidades sustentáveis através do design.

Em 2017 foi inaugurado o Robotic Fabrication Laboratory (Imagem 53), com uma área aberta de 765m² e estruturas de pórtico com 4 unidades ABB IRB 4600 suspensas em trilhos capazes de trabalhar em toda a área sincronicamente. Sua construção tem como objetivo facilitar a cooperação entre homem e máquina, e também permitir a automação completa de processos industriais em larga escala de fabricação digital. A inauguração desse novo espaço vai atender principalmente à consolidação de parcerias com a indústria já existentes, permitindo prototipagens mais robustas e até mesmo a produção de grandes peças para a arquitetura em seu próprio laboratório (Gramazio Kohler Research).

O Institute of Computational Design and Construction – University of Stuttgart, estabelecido em 2010, se dedica à pesquisa e ao ensino em design computacional e processos de manufatura assistidos por computador, com foco na exploração do uso integrativo de processos computacionais ao projeto de arquitetura. Interessam os métodos integrativos para a geração, simulação e avaliação de modelos baseados em informação e orientados à performance. Sua pesquisa se desenvolve em dois campos, o desenvolvimento teórico e prático de processos de design computacional generativos, e o uso integral de processos de manufatura controlados por computador com foco na fabricação robótica (ICD). A investigação na reciprocidade da forma, material, estrutura e ambiente, leva a uma exploração de maneira integrada dos avanços tecnológicos de produção em sistemas construtivos e materiais performativos.

O ICD conta com o Robotic Fabrication Laboratory (Imagem 54) equipado com um KUKA 125/2 de 6 eixos e uma mesa giratória que funciona como um sétimo eixo. Um segundo laboratório, ainda

Imagem 52: In situ Fabricator. Fonte: Gramazio Kohler Research.

Imagem 53: Robotic Fabrication Laboratory no novo edifício do Arch_Tec_Lab da ETH Zurich. Fonte: DFAB.



Imagem 54: Robotic Fabrication Laboratory. Fonte: ICD.

Imagem 55: Computational Construction Laboratory. Fonte: ICD.



em fase de implementação, Computational Construction Laboratory (Imagem 55) conta com 500m² de área de trabalho com grande flexibilidade espacial, e diversas possibilidades de configuração de seus sistemas robóticos chegando a 36 eixos de trabalho. Seus robôs incluem um KUKA Fortec KR420 R3080 sobre um trilho de 12m e um KUKA Quantec KR210 R3100 e duas mesas giratórias.

Em ambos os centros de pesquisa avançada vemos tecnologia de ponta aplicada ao ensino e pesquisa na exploração de novos processos de design, manufatura e pré-fabricação da arquitetura. Seu ensino e pesquisa tem nítidas diferenças em sua abordagem, que já podem ser notadas à importância dada à infraestrutura maquinária de cada laboratório. Se vemos um grande leque de *set-ups* de fabricação robótica desenvolvidos na ETH-Zurich, não quer dizer que estes não existam no ICD, mas não figuram como parte de seu portfólio. O ICD também possui uma unidade de fabricação in situ, além de explorar outras máquinas associadas ao braço robótico, como a máquina de costura industrial, por exemplo, mas estes são percebidos dentro dos processos de projeto, e não como parte da sua estratégia de divulgação. Veremos em maior profundidade essas diferenças a partir da análise de seus projetos. Enquanto o Gramazio e Kohler Research tem uma abordagem mais focal, examinando determinada técnica e desenvolvendo ferramental para ela, seu direcionamento maior se dá na exploração construtiva e operativa do processo. O ICD apresenta uma visão integrativa de todo o processo, com design e manufatura informando um sobre o outro, não apenas em relação à geometria e localização espacial, mas sobre a sua essência constitutiva, resultando em uma arquitetura adaptativa inserida em uma nova cultura material informada.

3.4 Os estudos de caso

“The second digital turn has just started, and the second digital style is still in the air.” (CARPO, 2017, p. 8)¹¹⁹

Chegamos aos objetos de estudo, as obras construídas que nos permitirão extrair a essência de processos desenvolvidos dentro desses centros de pesquisa e mapear o pensamento direcionador da prática de cada um. Os projetos escolhidos são considerados projeto-síntese de uma metodologia por levarem a experiência de laboratório à arquitetura construída, cada um à sua maneira. São resultados de pesquisas experimentais (às vezes ainda em aberto) que deram algum entendimento sobre a técnica, seus métodos possíveis, associações, que então demonstram a sua consolidação através de uma obra de arquitetura construída. No futuro da arquitetura, talvez, sejam considerados modelos do início de uma era computacional.

Produzido pelo grupo Gramazio Kohler Research, selecionamos o seu projeto de estreia, Gantenbein Vineyard Façade, que em 2006 causou grande impacto no meio arquitetônico pela aplicação do robô na produção de arquitetura, muito mais que pelo seu processo de design. Trata-se de uma fachada não-padronizada de tijolos produzida com o auxílio do robô. Esta linha investigativa foi a primeira conduzida pelo laboratório, utilizando um elemento tradicional da arquitetura, o bloco de tijolo, no ensino de design algorítmico e no início do desenvolvimento de interfaces com o robô explorando uma nova construtibilidade a partir de um elemento padronizado.

O segundo projeto escolhido foi intensamente divulgado, The Sequential Roof, a cobertura do novo edifício da ETH, que abriga o Arch_Tec_Lab. O projeto começou a ser ensaiado em 2010 e foi concluído em 2016, e é continuidade de outra linha de pesquisa importante dentro do laboratório, que utiliza sarrafos de madeira na investigação formal e construtiva. Envolveu uma grande equipe multidisciplinar e contou com o auxílio da indústria para a sua produção por conta da sua grande escala, trazendo inovações para o campo do design e da produção da arquitetura em madeira, bem como na transferência de conhecimento entre academia e indústria.

Dos projetos desenvolvidos no ICD - Institute for Computational Design and Construction extraímos dois pavilhões que se diferenciam de seus pavilhões anuais, desenvolvidos em colaboração com o ITKE - Institute of Building Structures and Structural Design. Ao extrapolar o âmbito acadêmico, fizeram parte de exposições públicas promovidas por museus, sendo um deles permanente. Não só possuem maior escala e complexidade, como demonstram a consolidação de

119 “A segunda virada digital acaba de começar e o segundo estilo digital ainda está no ar.” Tradução da autora.

todo conhecimento adquirido em suas experimentações através de seus pavilhões anuais. São eles o Landesgartenschau Exhibition Hall, de 2014, em placas de madeira compensada, e o Elytra Filament Pavilion, montado duas vezes, em 2016 e 2017, em fibra composta. Ambos derivam de processos biomiméticos de design computacional, produzidos através da fabricação robótica, resultando em estruturas leves e otimizadas. Ambos os materiais configuram as duas principais linhas de pesquisa do laboratório, onde uma explora a madeira e suas capacidades estruturais na determinação da forma, e a outra explora a fibra composta de uma nova maneira, que não demanda as fôrmas do passado, mas através de seu enrolamento¹²⁰.

Em seguida, apresentamos um contraponto às abordagens desses grandes centros de pesquisa, considerado relevante não pela consolidação de uma metodologia, mas por tangenciar o pensamento emergente com uma abordagem diferenciada. Trata-se do projeto Woodchip Barn, desenvolvido no Hooke Park em 2016, campus rural da AA School de Londres. Neste projeto identificamos uma abordagem local a ferramentas computacionais genéricas, abrindo caminho para a investigação seguinte, uma especulação sobre a apropriação dessas mesmas tecnologias nos Trópicos.

Mas antes de irmos às obras, é importante entendermos seus criadores. Acreditamos que a construção de um laboratório é feita coletivamente seguindo um vetor pré-estabelecido, que vai se desmembrando e mudando de curso ao longo da sua trajetória. Quem estabelece esse vetor é o seu criador/diretor como mentor do grupo, com certa qualidade visionária de onde quer chegar com a pesquisa, seja dentro do ambiente de ensino, ou expandindo esse potencial transformador para o campo disciplinar. A pesquisa avançada em design computacional e fabricação robótica possui um imenso potencial transformador ao combinar prática e teoria na expansão dos limites da produção da arquitetura através da tecnologia computacional. Por isso, faz-se necessário apresentar a trajetória desses pesquisadores, para entender de onde vêm e aonde querem chegar.

120 O processo utilizado se denomina Filament Winding, traduzido como Enrolamento Filamentar Contínuo. Veja a descrição do processo utilizado na indústria na produção de tanques de fibra de vidro: <http://coopmaco.com.br/wp-content/uploads/2014/02/Filament-Winding.pdf>. O ICD utiliza em seu processo fibras compostas de carbono e vidro impregnadas em resina, mas diferente da indústria, o objeto nem sempre é fixo a um eixo rotatório.

3.4.1 Gramazio Kohler Research - ETH Zürich

O grupo de pesquisa é comandado pela dupla de arquitetos Fabio Gramazio (1970) e Matthias Kohler (1968), ambos suíços. Sua trajetória começa a ser contada a partir da formação do escritório Gramazio & Kohler em 2000, onde a prática lhes concedeu diversos prêmios de inovação na arquitetura. Em 2005 formam juntos o Gramazio Kohler Research na ETH-Zürich, Swiss Federal Institute of Technology, criando um novo campo de pesquisa ao unir design avançado de arquitetura e processos de fabricação aditiva através do uso customizado de robôs industriais. São responsáveis também pelo National Centre of Competence in Research on Digital Fabrication (NCCR), um dos vários centros de pesquisa do governo suíço.

Seus projetos realizados dentro do laboratório estão mapeados cronologicamente no **Anexo 3**, e serão referenciados ao longo da análise dos projetos selecionados, enquanto sua produção teórica mapeada no **Anexo 1**. São 5 livros até o presente momento, 45 artigos científicos e 70 artigos e capítulos de livros. Seus temas principais são a fabricação robótica, o design computacional e a inovação material através da materialidade digital. Vale ressaltar, a título de comparação sua publicação de 2014, a convite da revista *Architectural Design*, intitulada *Made by Robots: Challenging Architecture at a Large Scale*. Seus autores convidados são pesquisadores da área de robótica e design computacional e os principais desenvolvedores da incipiente indústria de fabricação robótica para o design.

Apresentado os autores e o panorama da sua produção e pensamento, seguimos para a análise de suas obras mais significativas. O primeiro foi desenvolvido no início das pesquisas dentro da ETH, e tem sua importância no pioneirismo de uma metodologia de materialização do digital. O segundo, desenvolvido 10 anos depois, vem alçar essa produção diferenciada a um patamar de larga escala, extrapolando seu impacto da vanguarda em pesquisa, para impactar diretamente a produção de arquiteturas em um futuro próximo.

Gantenbein Vineyard Facade, Fläsch, Suíça, 2006

Fachada não padronizada de tijolos

À convite do escritório Bearth & Deplazes Architekten, Gramazio e Kohler desenvolveram a fachada do seu novo edifício em construção para a empresa Gantenbein Wine, produtora de vinhos nas montanhas suíças. O edifício abriga um grande salão de fermentação de uvas, uma adega subterrânea e um terraço para recepções de degustação de vinho. A estrutura reticulada de concreto pré-fabricado de rápida montagem é encerrada por planos de tijolo ideais por suas qualidades térmicas ao prover as condições necessárias para a pro-

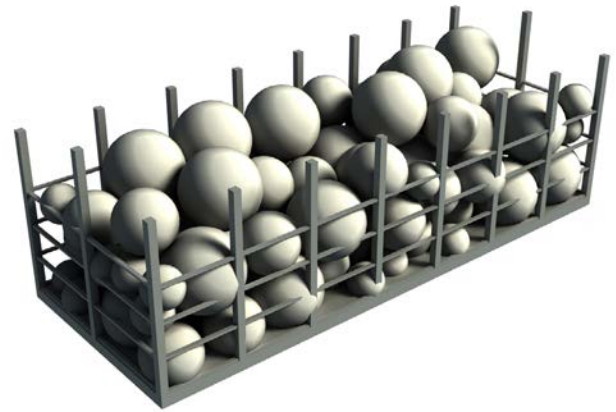
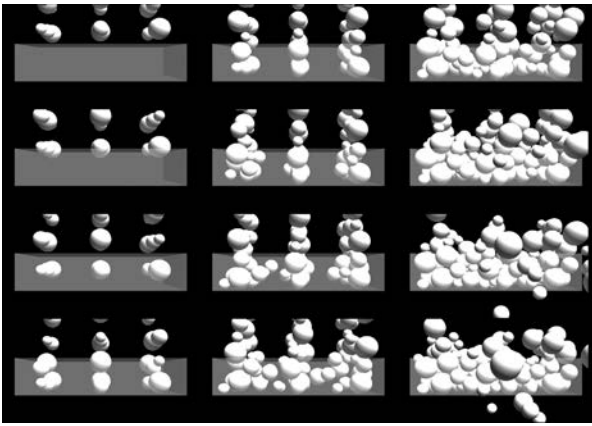


Imagem 56: Processo de simulação volumétrica através da força da gravidade. Fonte: Archdaily.

Imagem 57: Diagrama da forma e da estrutura. Fonte: Archdaily.

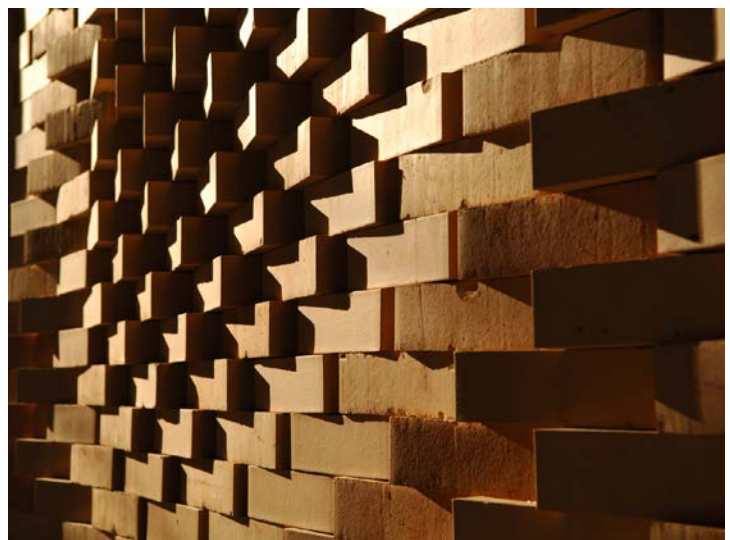
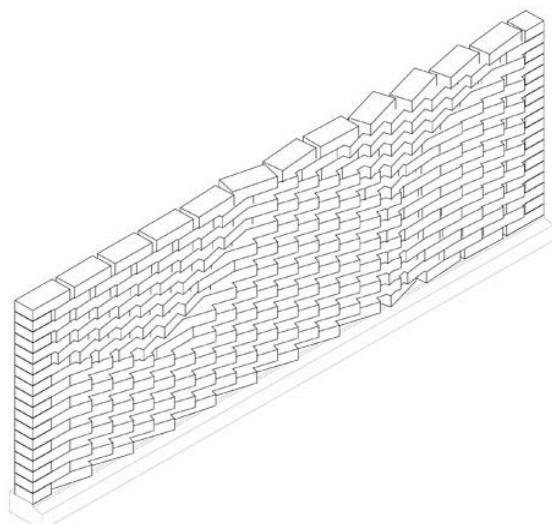
dução de vinho. A dupla tomou partido do design computacional e da infraestrutura de fabricação robótica recém adquirida em seu laboratório para colocar à prova a aplicação do robô na construção de arquiteturas não padronizadas. Foi a estreia desse processo fora do canteiro experimental da universidade.

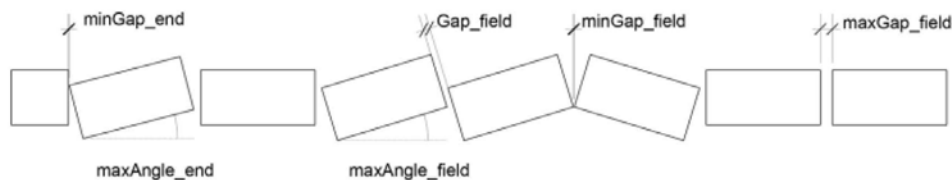
Seu **processo de design**, utilizando design paramétrico, partiu do volume do edifício tomado como um recipiente vazio, onde esferas de diversos tamanhos foram lançadas virtualmente através de simulação da gravidade. A maneira aleatória como essas esferas se assentam no espaço e tocam a superfície da caixa foi tomada como parâmetro definidor da textura da fachada (Imagens 56 e 57). Os dados do modelo digital informam a orientação individual dos 20.000 tijolos que compõem os planos de fachada. Além disso, foi informado ao design o material utilizado na fabricação, pois sua exata dimensão e rotação influenciam em sua geometria.

O projeto foi desenvolvido antes de existirem softwares de programação visual para arquitetura, utilizando o MAYA através da linguagem MEL, comumente usado na animação de formas através de uma programação de nuvens de pontos. A ferramenta de design dá dinamicidade ao sólido, já que permite o movimento, onde a forma é resultado de uma animação. O modelo é transformado em imagens

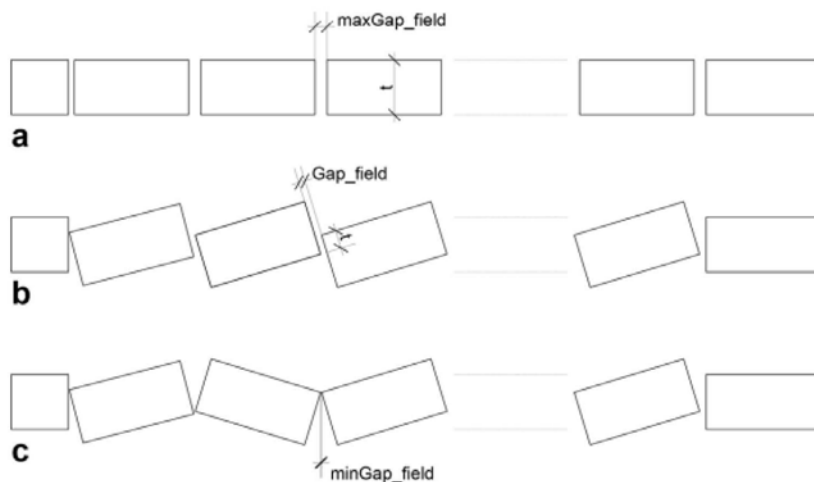
Imagem 58: Disposição dos tijolos sobre viga de concreto. Fonte: Archdaily.

Imagem 59: Variação da angulação dos tijolos. Fonte: Archdaily.





Element 3.33 / 12.5	
brick/row:	12 1/2
element length:	3330.0mm
Attributes	
maxAngle_end:	14.58°
maxAngle_field:	16.96°
minGap_end:	2.0mm
minGap_field:	2.1mm
maxGap_field:	25.2mm
Gap_field:	13.7mm



a	gap:	9.57%
	depth t:	115mm
b	gap:	5.06%
	depth t:	38mm
c	gap:	0.76%
	depth t:	0mm
a/b/c	gap:	5.13%
	depth t:	51mm

em escala de cinza que informam a rotação de cada elemento. Estes se encontram fixos no plano vertical, com a limitação de ocupar apenas 180mm de espessura, são rotacionados de acordo com a escala de tom. Aqui, a informação de cor do pixel se transforma em grau de rotação. Outra abordagem a esse processo, usada posteriormente, envolve a manipulação 3D de superfícies e através de um script os elementos são mapeados nela, dando maior liberdade formal (BONWETSCH et al., 2006 e 2007).

Imagem 60: Estudo da relação entre espaçamento, rotação e o espaço efetivo entre os tijolos. Fonte: BONWETSCH, 2015, p. 95.

A disposição de assentamento dos tijolos escolhida foi em alvenaria de meia vez, e cada elemento foi diferencialmente rotacionado a partir de seu ponto médio, até 17° em ambas as direções (Imagens 58 e 59). A função aplicada no design algorítmico garante que não haja colisão e ao mesmo tempo haja superfície de sobreposição suficiente para a colagem dos elementos entre si, através da negociação entre rotação e espaçamento entre os blocos. O aspecto visual dessas variações foi estudado através de modelos físicos 1:1, definindo a extensão dos valores desejados a serem remapeados. Estes modelos também foram submetidos a testes de carga para validar a resistência dessas escolhas. Enquanto a rotação é definida pela imagem em gradiente, o espaçamento é definido pela porcentagem de abertura desejada para a entrada de luz natural (Imagem 60). Através do jogo de luz e sombra criado, e da variação de matiz dos tijolos rotacionados, a solidez da parede é diluída, ganhando movimento e leveza (Imagem 61).

Há época, esses processos de design já vinham sendo usados na prática da arquitetura, inclusive orientados para a fabricação digital. No entanto, por se tratar de fabricação robótica, o próprio arquivo 3D de design é usado para gerar o controle da ferramenta de fabricação.

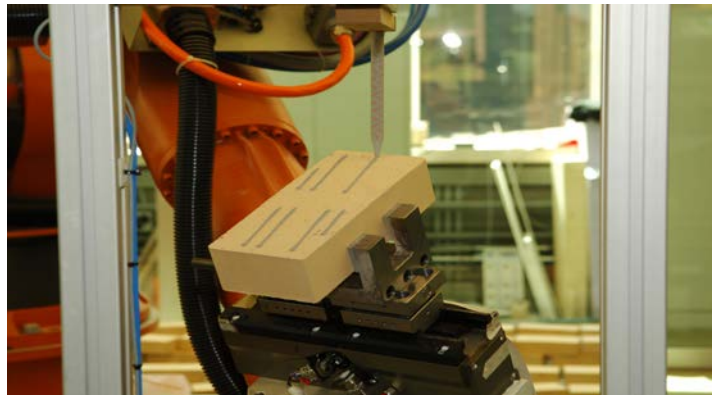


Imagem 61: Efeito visual da fachada. Fonte: Archdaily.

Como pioneiros nessa área, foi necessário desenvolver ferramentas de apoio à fabricação, demonstrando que nesse momento de aproximação da arquitetura e computação, torna-se necessário trabalhar diretamente com desenvolvedores de tecnologias robóticas e computacionais para construir as ferramentas que darão suporte à prática (BONWETSCH et al., 2007).

Com a obra já em andamento, a equipe teve um tempo limitado para projeto e execução, no entanto, as tecnologias digitais utilizadas encurtam o processo, já que o próprio design é a informação de fabricação. Foram realizados 8 estudos em escala real para aprimoramento do **processo de produção**, que já vinha sendo desenvolvido como projeto de ensino e pesquisa. Por conta da inclinação diferenciada de cada elemento, a aplicação do agente aglutinante foi automatizada para aplicação específica na área de sobreposição entre os blocos. Testes estruturais realizados nestes protótipos levaram à definição de quantos lastros de cola seriam necessários na face de cada tijolo e seus respectivos intervalos, dando validade à eficiência estrutural do sistema. Diferentemente de paredes de alvenaria pré-fabricadas convencionalmente, este sistema não necessita de reforço através de armaduras. Isso acontece pelas propriedades do material aglutinante utilizado, uma cola epóxi bi-composta que é capaz de suportar forças de tensão exigidas durante o transporte dos módulos.

Os 72 módulos de 3.33m ou 4.75m de largura por 1.48m de altura foram produzidos sobre vigas pré-fabricadas de concreto, onde o robô assentou cada tijolo diferenciadamente. Para tornar mais efi-



ciente a produção, 4 módulos eram produzidos simultaneamente, dispostos paralelamente sob o alcance do braço. Este percorre as distâncias longitudinais da parede sobre um trilho. Uma calha rolante fornece os tijolos, que são pegos pelo robô utilizando uma garra específica para o tijolo, uma pinça de dois dedos paralelos (*2-finger parallel gripper*). Ele então leva a um dispensador automatizado estático de aglomerante, que deposita um padrão específico de cola de acordo com a peça. Os movimentos do robô são coordenados com a liberação do material (BONWETSCH et al., 2007). O braço então deposita o tijolo em sua posição específica. Ao final do processo, os módulos de parede pré-fabricados são transportados para o canteiro de obras e montados com o uso de guindaste¹²¹ (Imagens 62 a 65).

Apesar da expressão tridimensional da textura, que vista de longe na paisagem remete a uma caixa cheia de uvas, sua composição se dá em um único plano vertical. Se à distância, essa textura cria uma fachada dinâmica que varia dependendo da posição do espectador e do ângulo de incidência do sol, internamente, são os espaçamentos entre os tijolos que saltam à vista. A variação controlada desses espaçamentos filtra a luz direta criando a atmosfera ideal para a fermentação das uvas, enquanto panos de policarbonato encaixados nos vãos estruturais bloqueiam os ventos e permitem a aclimatização do ambiente (GRAMAZIO et al. 2008b). No piso superior, apenas uma fileira de módulos de tijolo formam a balaustrada do terraço (Imagens 66 e 67).

Com essa primeira obra construída, a construção com tijolo é

Imagem 62: *Set-up* de fabricação. Fonte: International Academy of Ceramics.

Imagem 63: Deposição diferenciada da cola epóxi. Fonte: International Academy of Ceramics.

Imagem 64: Assentamento diferenciado dos tijolos. Fonte: International Academy of Ceramics.

Imagem 65: Montagem *in loco* da parede pré-fabricada na estrutura de concreto pré-moldado. Fonte: International Academy of Ceramics.

121 Ver processo em <https://vimeo.com/69252842>



Imagem 66: Edifício Gantenbein Vineyard finalizado. Fonte: Archdaily.

elevada a um novo patamar jamais visto, da diferenciação total de seus elementos através da computação tanto no processo de design, como no de fabricação. Robôs já haviam sido empregados anteriormente no assentamento de blocos de alvenaria, mas não de forma diferenciada a partir de um design computacional (BONWETSCH, 2015, p. 41). Vê-se neste momento, uma pesquisa em aberto com uma série de questões passíveis de serem investigadas mais a fundo, que o laboratório irá desenvolver nos anos seguintes. A Gantenbein Vineyard Facade foi precedida pelo projeto de ensino **The Programmed Wall (2006)** (ver Anexo 3), conduzido com estudantes do mestrado e colaboradores, além de parceria com a indústria. Foi a primeira vez que o robô foi utilizado para o assentamento de tijolos de uma forma não-padronizada, provando o conceito de processo aditivo por fabricação robótica aplicável à arquitetura. Ao longo do semestre, foram produzidos 6 protótipos em escala 1:1 e 3 instalações finais, onde algumas disposições de parede de alvenaria foram testadas (GRAMAZIO e KOHLER, 2014a, p. 44-53). Cada disposição de assentamento de tijolos possui uma lógica de design mais adequada para garantir suas qualidades estruturais e manter o seu centro de gravidade ao ter seus componentes variados. Foi o experimento-teste que permitiu a sua inclusão dentro de um projeto de arquitetura no mesmo ano, e que trouxe outra percepção à solidez da parede de tijolo.

Depois dessas experiências, por conta de diversas questões técnicas em aberto para o processamento robótico de alvenaria, a pesquisa foi continuada através do **Flexbrick¹²² (2008-2012)** para construção de fachadas diferenciadas de tijolo. Uma das questões estudada foi a composição do adesivo epóxi que substitui a argamassa, para o aperfeiçoamento da sua capacidade de transferir forças de tensão dentro do sistema, essencial para projetos seguintes. Outra questão é que

122 Ver <https://vimeo.com/69247420>.



Imagem 67: Espaço interno fechado com chapas de policarbonato. Fonte: Archdaily.

o aglomerante não mais funciona como nivelador do sistema, corrigindo as imperfeições intrínsecas ao processo de fabricação dos tijolos, e o seu assentamento robótico vai acumulando essas imperfeições ao longo da sua produção. Para isso, foi desenvolvido um sistema com sensor capaz de medir os desvios da parede e algoritmicamente calcular e realizar compensações de tolerância onde fosse necessário. Vemos aqui um grande avanço nesse processo, onde a produção passa a informar o design. Se antes o fluxo de informação era do material e do processo de fabricação para o design, e então para a produção, vemos aqui a criação de um loop de informação, onde a produção informa suas condições materiais de tolerância, e o design é adaptado a elas, voltando com nova informação para a produção. Essa tecnologia consolidada foi mais tarde demonstrada no projeto **The Endless Wall** ¹²³ **2011**).

Paralelamente, foi desenvolvido um modelo de tijolo mais adequado ao uso da cola, que minimiza tolerâncias de montagem ao ter alta precisão em sua padronização. Além disso, foi desenvolvido um plug-in para Rhinoceros para o design de alvenarias de tijolo diferenciadas, o **BrickDesign**¹²⁴, que permite a manipulação paramétrica em tempo real de seus elementos¹²⁵. Com as melhorias do sistema de pré-fabricação de parede de tijolo resultantes dessa pesquisa, sua aplicabilidade foi expandida.

Em **Structural Oscillations**¹²⁶ **(2008)**, uma instalação de

123 Ver <https://vimeo.com/69238768>

124 Ver <https://rob-technologies.com/robotic-brickwork> e <https://vimeo.com/170169297>.

125 Logo em seguida ao projeto da Gantenbein Vineyard o grupo desenvolveu um software de design específico para a fabricação robótica de alvenarias. No entanto, a ferramenta era limitada à parede de meia vez em um plano vertical. O ROB Creator foi desenvolvido para dar suporte ao ROB Unit, a unidade móvel de fabricação do grupo (BONWETSCH, 2015, p. 91).

126 Ver <https://vimeo.com/69236155>.

paredes de tijolo de 100m de comprimento, não haviam os mesmos limitantes rígidos do perímetro (vigas e pilares) encontrados na Gantenbein Vineyard Facade. O que levou a uma exploração maior da plasticidade da parede, com diferentes linhas guias oscilantes em seu limite inferior e superior. Nesta abordagem, a superfície é definida e a programação distribui os componentes. Na época, o laboratório já contava com a unidade móvel de fabricação R-O-B, que produziu as peças no local, e foram alocadas em suas posições com uma empilhadeira. Justamente a ondulação da linha guia permite que cada módulo de parede de 4m de comprimento fique firme e estável sem necessidade de suportes adicionais, pois cada curvatura da linha de base, é balanceada com uma contra-curvatura na linha superior.

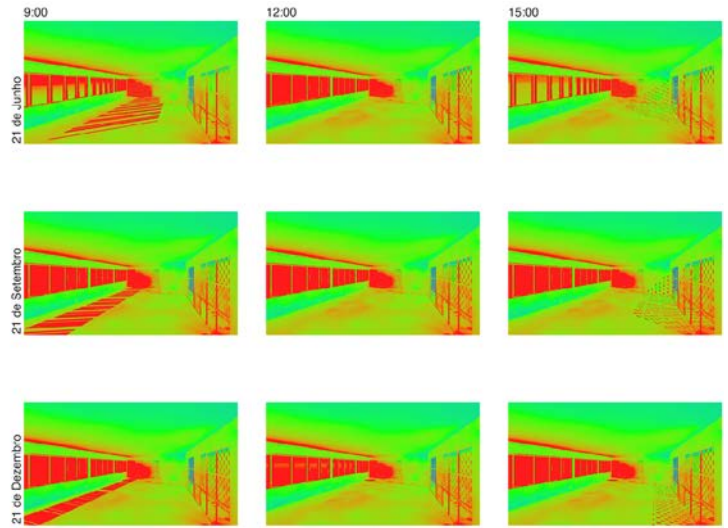
Em seguida, a primeira instalação urbana a ser montada roboticamente *in situ* foi a **Pike Loop**¹²⁷ (2009). Aqui, o processo deixou de ser a pré-fabricação de elementos a serem posteriormente montados, mas a sua fabricação contínua no local. Seu design não permitia a segmentação em partes, pois trata-se de um loop contínuo que se entrelaça em diversos pontos ao longo de seus 22.5m. Assim, o robô, dentro de um container, é deslocado ao longo do processo de montagem. Além disso, o aperfeiçoamento técnico do sistema de tijolos e cola epoxi bi-composta alcançou qualidades estruturais que tornou possível uma parede de tijolo flutuar. O resultado é uma superfície serpenteada que alça voo do chão, compondo e contrastando, simultaneamente, com o entorno de tijolos de Nova Iorque.

Aqui cabe um paralelo com uma produção brasileira que também aplica tijolos de forma diferenciada. O projeto **coBLOGó**, de 2014, desenvolvido pelo escritório paulista SUBdV, toma partido do método que intitula de *High-Low* (Imagem 68). O projeto utiliza alta tecnologia no processo de design através da computação paramétrica, mas é produzido por uma mão de obra não especializada, através de informações extraídas do digital. Enquanto no Gantenbein Vineyard os parâmetros formais inseridos foram as esferas sob influência da gravidade e as qualidades ambientais foram medidas através de porcentagens, o coBLOGó tomou partido do avanço das tecnologias digitais para a simulação. Nele foram testados diversos parâmetros formais, variados pela força de atração, para gerar a rotação e o espaçamento dos elementos diferenciadamente, através de programação visual. Os resultados obtidos foram confrontados com demandas para o desempenho ambiental do edifício através da simulação da insolação e da iluminância, através de plug-in visual de simulação ambiental (Imagem 69). As informações de projeto se tornaram mais acessíveis e o design baseado em performance reflete não apenas parâmetros inseridos pelo arquiteto, mas também questões ambientais do entorno através da simulação. Dessa forma, se obtém maior controle e otimização do sombreamento e da iluminação natural de seu espaço interno. Em

127 Ver <https://vimeo.com/69255930>.



Iluminância



relação ao seu processo de fabricação, foi necessário adaptá-lo às condições brasileiras de canteiros de obra de baixa tecnologia. Para isso, foram gerados através de script gabaritos de papelão cortados a laser. Para organizar os gabaritos em suas fiadas, foi construída uma estante de madeira onde os gabaritos eram posicionados guiando o assentamento manual dos blocos de concreto com argamassa. Nesse sistema foi necessário utilizar vergalhões para reforço da estrutura (Imagem 70).

Ao longo desta análise, podemos ver que são diversos os enfoques das pesquisas conduzidas pelo Gramazio Kohler Research na investigação da construção com tijolos através do robô, explorando um leque de possibilidades. Cada uma possui um objetivo específico, mas fica claro que o objetivo geral está no desenvolvimento da aplicabilidade do robô no canteiro de obra para a produção de arquiteturas digitais. O processo de design computacional fica ofuscado pela fabricação robótica e suas questões técnicas de materialização e programação. Sendo a questão da aplicabilidade na indústria tão importante dentro do escopo da pesquisa do laboratório, que a tecnologia desenvolvida para a construção de elementos não padronizados com respostas imediatas ao local e à variação material, continua através do projeto **On-site Robotic Construction** (em andamento). Dessa vez, com suporte do governo suíço através do National Competence Centre of Research (NCCR) on Digital Fabrication, o grupo desenvolve um *framework* de design computacional e simulação capaz de operar máquinas robotizadas em ambientes incertos, em parceria com o laboratório de robótica da ETH.

Segundo os autores, “Somente quando a arquitetura digital assumir um papel mais radical e substancial na realização estética e material da arquitetura, a disciplina finalmente chegará à era digital.” (GRAMAZIO e KOHLER, 2014b). Através da análise de como se desenvolve essa linha de pesquisa dentro do laboratório, fica claro que o grupo trabalha desenvolvendo os meios desse potencial transfor-



Imagem 68: CoBLOGó, SUBdV, 2014. Fonte: Archdaily.

Imagem 69: Simulação da iluminância no ambiente a partir da variação da posição dos blocos. Fonte: Archdaily.

Imagem 70: Processo de produção com moldes cortados digitalmente e assentamento manual dos blocos de concreto. Fonte: Archdaily.

mador do design computacional se materializar e ser incorporado ao ofício, impactando a indústria da construção e seus modos de operar.

The Sequential Roof, Zürich, Suíça, 2016

Estrutura complexa de cobertura de madeira

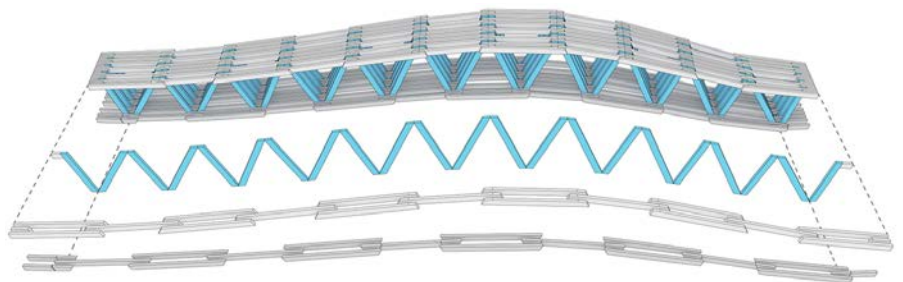
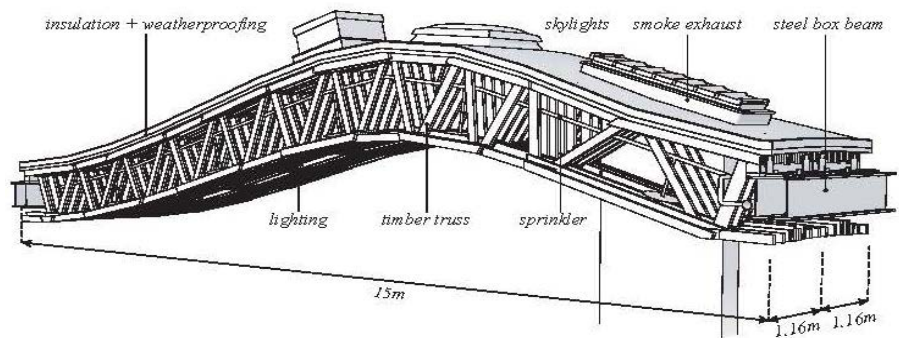
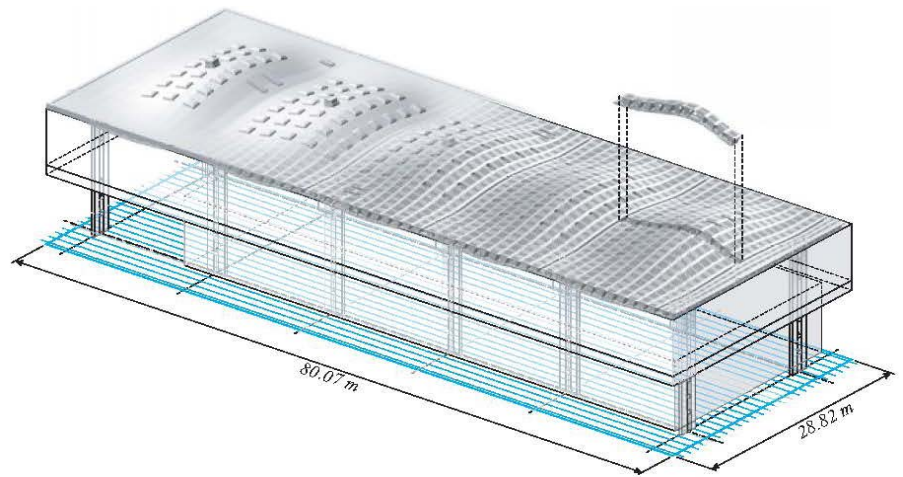
Este projeto possui uma escala muito maior que o anterior, não somente em termos de área que ocupa, mas de seu impacto na arquitetura. Não se trata apenas de um projeto de arquitetura inovador por sua técnica, mas um projeto colaborativo entre academia e indústria no desenvolvimento de novas ferramentas e processos de suporte à sua realização. Vamos abordar aqui a cobertura do edifício Arch_Tec_Lab, novo laboratório do ITA - Institute of Technology in Architecture da ETH- Zürich, que também abriga o novo laboratório do grupo Gramazio Kohler Research, o Robotic Fabrication Laboratory. O edifício foi concebido como um modelo demonstrativo de como tecnologias digitais e processos colaborativos podem contribuir para construções mais eficientes (ITA). Em seu escopo está não só o desenho paramétrico e a fabricação digital, mas a sustentabilidade e eficiência de seus sistemas HVAC¹²⁸ (*heating, ventilation and air-conditioning*), MEP¹²⁹ (*mechanical, electrical and plumbing*) e sistemas estruturais, sendo esse o próprio campo de pesquisa a ser desenvolvido ali dentro nos novos laboratórios (APOLINARSKA et al., 2017).

O grupo Gramazio Kohler Research ficou encarregado do projeto da cobertura, onde puderam aplicar o conhecimento em estruturas de madeira diferenciadas que desenvolviam desde 2008. Esse projeto não só demonstra como processos de design e fabricação computacional permitem o surgimento de novas soluções arquitetônicas, mas mudam a lógica de projeto. O design computacional permitiu a integração de todas as disciplinas de projeto e planejamento desde a fase da concepção à fabricação e sua construção, ampliando o campo da arquitetura através da integração interdisciplinar.

A cobertura do edifício ocupa uma área de 2300m² composta por uma estrutura permeável de multicamadas treliçadas de madeira. O design computacional permitiu a adaptação da estrutura ao compatibilizar as necessidades estruturais do sistema e as demandas dos subsistemas da arquitetura como iluminação, claraboias e sprinklers (Imagens 71 e 72). O conceito direcionador da forma ondulante da superfície em dupla curvatura não fica claro, sendo ressaltadas apenas as questões técnicas de viabilização da arquitetura. O projeto tira partido do modelo computacional e da sua capacidade interativa de refinamento de acordo com critérios formais específicos, assim como por

128 Aquecimento, ventilação e ar-condicionado.

129 Mecânica, elétrica e hidráulica.



assimilar informações do processo de fabricação e da otimização da estrutura por simulações.

São 50 mil peças únicas de sarrafo de madeira, cortadas em seu comprimento e ângulo específicos, montadas pelo robô em treliças planas. Essas treliças são montadas camada a camada no plano horizontal, com um total de 23 camadas em cada peça. As cordas superiores e inferiores das treliças são formadas por curvas Bézier¹³⁰ segmentadas para que o material retilíneo possa gerar a curvatura desejada. Cada corda ocupa 3 camadas de sarrafo que se “abraçam” nas junções. Desses nós, saem também as barras diagonais que ocupam apenas 1 camada do sistema (Imagem 73). A ordem em que os sarrafos da corda se encontram varia para comportar a iluminação, ou seja, a modulação de seu ritmo é algorítmicamente controlada por necessidades pontuais.

Imagem 71: Vista isométrica da cobertura, com 168 peças treliçadas apoiadas em estrutura de aço. Fonte: APOLINARSKA et al., 2016.

Imagem 72: Par de peças treliçadas com seus subsistemas. Isolamento e impermeabilização vão diretamente sobre a estrutura sem a necessidade de chapeamento. Fonte: APOLINARSKA, 2016.

Imagem 73: Camadas que compõem a peça treliçada. Fonte: ROB Technologies.

130 A curva de Bézier é uma curva polinomial expressa como a interpolação linear entre alguns pontos representativos, chamados de pontos de controle. https://pt.wikipedia.org/wiki/Curva_de_B%C3%A9zier

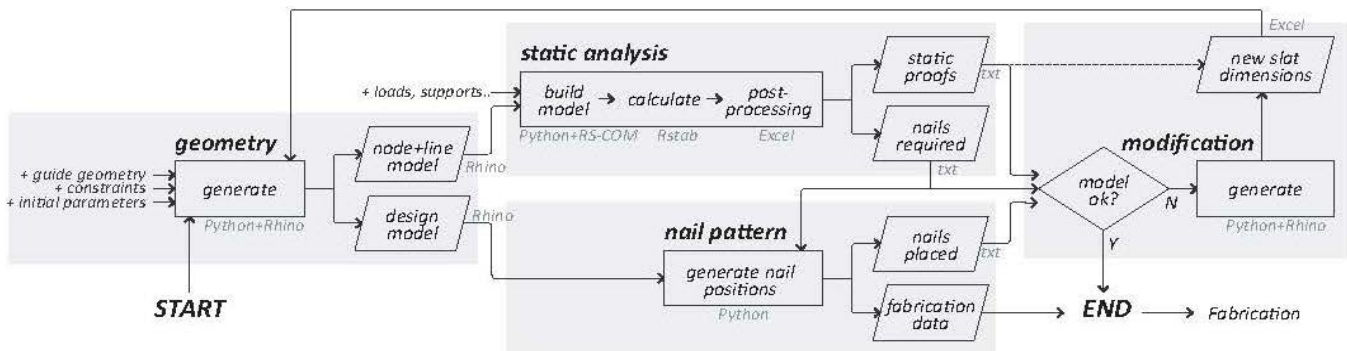
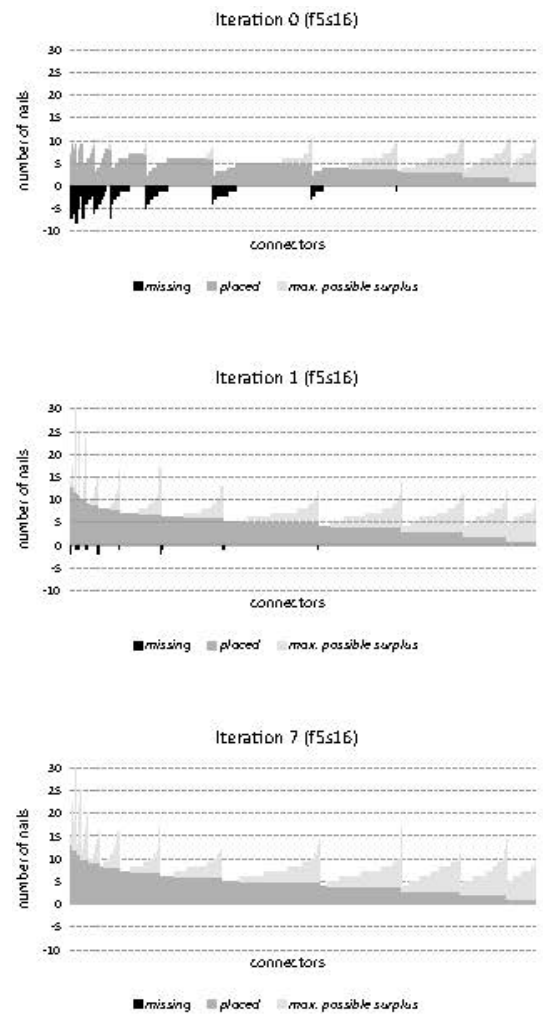
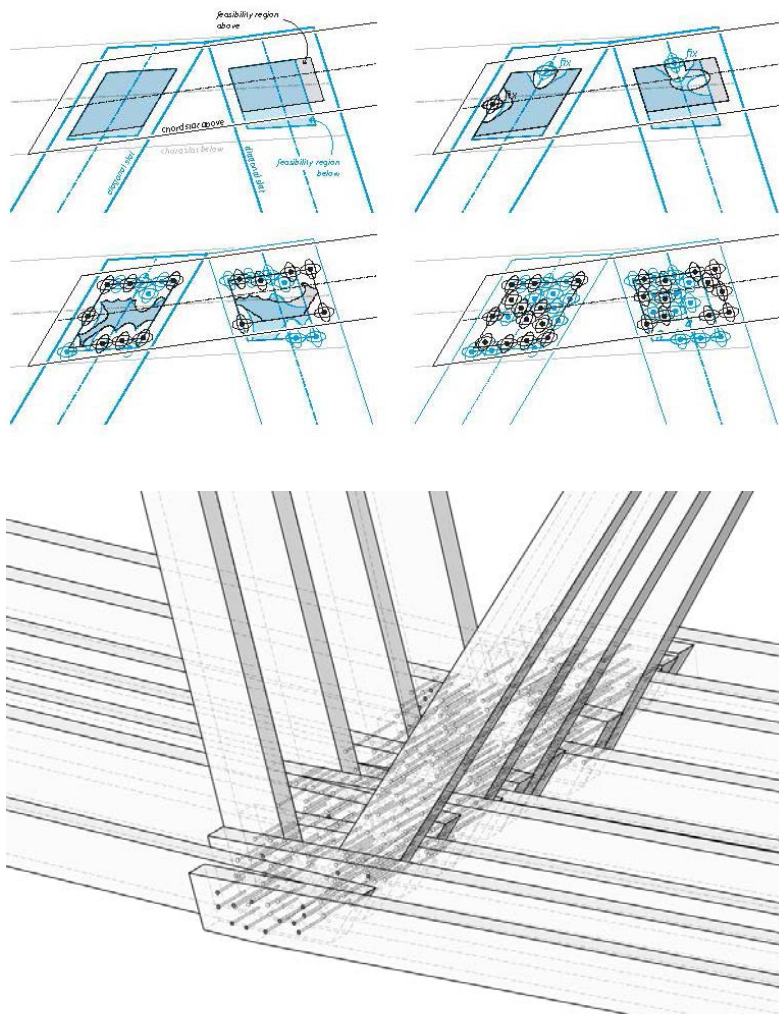


Imagem 74: Esquema do fluxo de trabalho computacional. Fonte: APOLINARSKA et al., 2016.

Por se tratar de um projeto multidisciplinar e altamente experimental, foi necessário contar com um envolvimento colaborativo de todas as áreas desde o estágio inicial. Arquitetos, engenheiro estruturais, especialistas em construção com madeira, segurança contra fogo, impermeabilização, iluminação natural, e potenciais parceiros da indústria trabalharam integradamente no **processo de design**. Para isso, foi preciso desenvolver um *framework* de design integrado, onde diferentes tipos de informações são colocados como *input* a serem conectados e processados integradamente na geração do modelo computacional. Nele, parâmetros normativos, da arquitetura, da engenharia estrutural e da fabricação são negociados ativamente (APOLINARSKA et al., 2016).

Na ausência de uma plataforma digital que comportasse todas as demandas de um projeto integrado, foi preciso desenvolver ferramentas do tipo *add-on* para o *software* de modelagem 3D baseado em NURBS, o Rhinoceros, e também para o *software* de cálculo estrutural e dimensionamento, o RSTAB (Imagem 74). A geometria é gerada através de *script* (Python), onde são inseridos dados geométricos, parâmetros iniciais e limitações. Esse modelo gera uma abstração em linhas e nós que vai para análise estrutural, e também é usado para simulações do processo de fabricação. A programação também foi utilizada para automatizar os cálculos estruturais, que ao lidar com muita informação, levavam longos períodos de tempo para processamento. O resultado dessa análise gerou informações que realimentaram o modelo de design, resultando em alterações nas dimensões dos sarrafos e em dados para a simulação dos pregos necessários em cada junção.

Para a simulação do processo de fabricação também foi necessário desenvolver *software* para automatizar seus processos. A empresa nascida a partir do grupo de pesquisa Gramazio Kohler Research, a ROB Technologies (responsável pelo BrickDesing mencionado anteriormente), ficou encarregada da integração do processo de fabricação junto às capacidades do robô a ser utilizado, criando o WoodFlex 56¹³¹, *software* que controla um robô multifuncional de 6 eixos em pórtico. Por se tratar de uma estrutura com junções únicas (são 94380 junções calculadas individualmente), foi preciso computar para cada uma delas a quantidade de pregos necessária, levando



em consideração a área de sobreposição dos sarrafos com margem da borda, o espaçamento exigido entre os pregos e o desvio dos pregos da camada subsequente (APOLINARSKA et al., 2016). Esse processo complexo realizado por iteração gerou informações que alimentaram o modelo computacional com a necessidade de mais área de sobreposição em nós específicos (Imagens 75 a 77).

As simulações estruturais precisaram ser confirmadas através de testes, uma vez que não existem modelos válidos aplicáveis a uma estrutura singular. Na verdade, os testes estruturais começaram bem antes, como pesquisa em laboratório, em 2010. Nessa época, foi desenvolvido *end effector* específico, a ferramenta acoplada ao punho do robô, para trabalhar o material, capaz de checar a pressão de contato das junções fabricadas. O primeiro modelo produzido, em escala 1:2, foi submetido a testes de carga para sua validação estrutural. Os resultados superaram as capacidades estruturais calculadas, permitindo sua proposição como solução ao projeto de cobertura. Também foi submetido a testes em laboratório para análise da transmissão de luz através das treliças. Dados da simulação com modelo físico em um domo de luz alimentaram as simulações digitais de toda superfície, para estabelecer uma iluminação natural ideal ao ambiente de trabalho (Imagem 78) (GRAMAZIO e KOHLER, 2014a, 250-259). Essas informações também

Imagem 75: Etapas de solução do nó. Situação inicial com áreas de sobreposição; primeiros pregos de fixação e área viável remanescente; distribuição subsequente na décima iteração; situação quase completa onde se evitou sobreposições de área de influência de cada prego. Fonte: APOLINARSKA et al., 2016.

Imagem 76: Iterações executadas onde são mapeados a quantidade de pregos faltantes (preto), os já locados (cinza escuro) e o excedente máximo possível (cinza claro). Fonte: APOLINARSKA et al., 2016.

Imagem 77: Distribuição final dos pregos a ser processada na fabricação. Fonte: ROB Technologies.



Imagem 78: Estudo com domo de luz para análise da transmissão de luz através da estrutura de multicamadas. Fonte: GRAMAZIO, 2014a.

alimentaram o novo modelo computacional, em relação à omissão de segmentos sob as claraboias para otimização da transmissão da luz ao ambiente interno.

Quanto aos novos testes estruturais, agora em escala real, foram testados diferentes ângulos para os nós, simulado com apenas 3 sarrafos que serviram para informar também sobre o melhor padrão de distribuição dos pregos. Aqui, o modelo de fluxo de trabalho apresentado pelo grupo (Imagem 74) omite essas informações vindas do modelo físico que voltam para o refinamento do design. Uma seção de 15 camadas de treliças planas faceadas foi fabricada, também servindo como teste para o processo de manufatura desenvolvido, onde foram aplicadas as cargas para validação do design. As informações advindas desse processo realimentaram o modelo computacional que passou por novas iterações para diferenciar localmente a largura dos sarrafos de acordo com as exigências estruturais e de área de sobreposição para fixação. Nesse momento foram definidas três larguras de sarrafo: 115, 140 e 180mm, todos com 50mm de espessura.

A configuração topológica da estrutura se mostra flexível ao



permitir mudanças globalmente e localmente controladas para atender a todas as necessidades do projeto. A curvatura superior e inferior das cordas das treliças, o comprimento de suas peças, a altura do sistema, a distribuição das barras diagonais e a localização dos nós, todos são baseados em parâmetros alteráveis para melhorar sua performance, otimização e acomodar os subsistemas da arquitetura.

Imagem 79: Processo de fabricação das treliças planas. Fonte: ITA.

Imagem 80: Posicionamento das peças treliçadas sobre estrutura de aço. Fonte: ITA.

Essa alta diferenciação do sistema, sem padrões repetitivos só é possível ser construída através de **processos de fabricação** de controle computacional. Para que o processo de manufatura pudesse ser completamente automatizado, ou seja, nenhuma intervenção manual em seu fluxo, somente foram levadas em consideração junções que coubessem dentro das limitações de fabricação. Para isso, o sistema se limita a um único tipo de junção, com sarrafos sobrepostos em camadas unidos mecanicamente por pregos. Testes anteriores com cola descartaram essa opção, e além disso, havendo colapso das fibras em um sarrafo, o prego é capaz de torcer e dar suporte para que a estrutura redistribua as forças e se reacomode.

O desenvolvimento da configuração de fabricação simultânea ao processo de design foi responsável pela determinação da lógica de camadas e a subdivisão da estrutura, de acordo com a sequência de construção e limitações de sua fabricação. Além do desenvolvimento da plataforma operacional do sistema de fabricação, a configuração de fabricação também foi desenvolvida contando com: robô multifuncional WoodFlex 56, já empregado para demandas específicas da construção com madeira, sobre pórtico com 6 eixos de articulação; dois *end effectors*, uma para pegar os sarrafos e ao mesmo tempo com disparador de pregos, e outro com serra de disco para aparar arestas (seu processo de troca é automatizado); além da serra de mesa automatizada e dos dispensadores de material específico. Todo esse *set-up* é disposto sob o pórtico de trabalho do robô.

As 168 peças de treliça foram produzidas através de uma série de processos automatizados sequenciados¹³². Primeiro, com o *end ef-*

132 Ver <https://youtu.be/yOYMtLmCYul>

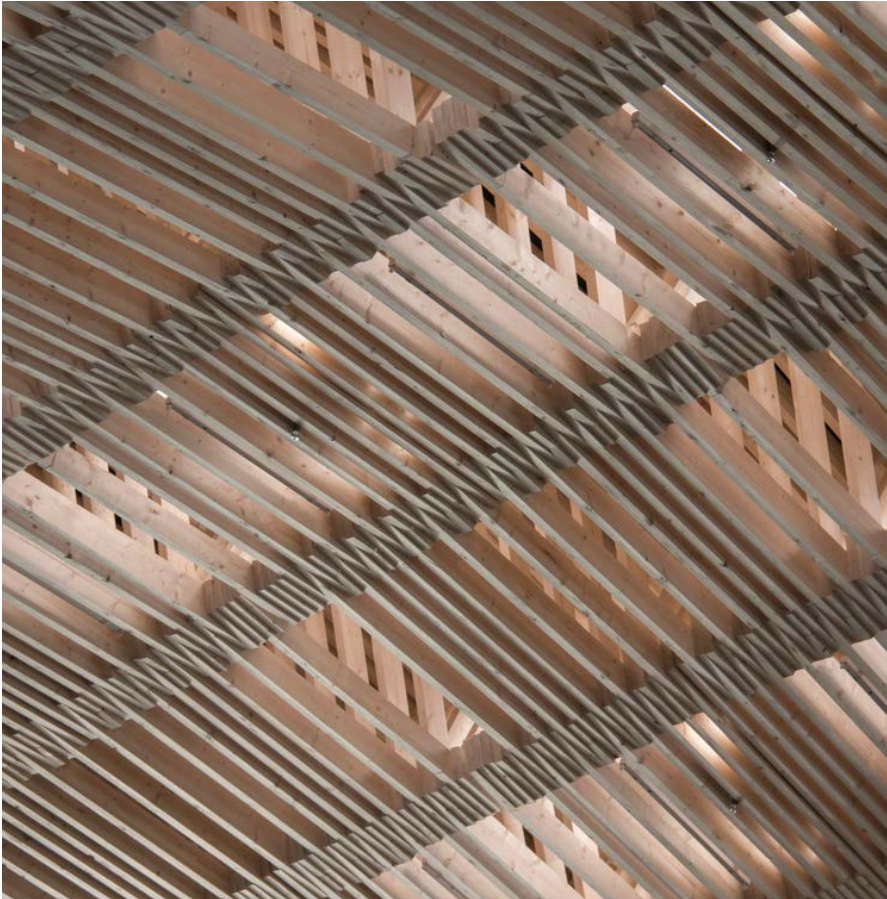


Imagem 81: Detalhe da superfície interna. Fonte: ROB Technologies.

factor tipo garra (*gripper*), uma pinça própria para o material, o robô pega o sarrafo específico entre as 3 dimensões usadas, leva para a serra de mesa, posiciona e corta as duas extremidades da seção, com comprimento e ângulos específicos. A peça então é posicionada na treliça e fixada preliminarmente com um prego em cada extremidade, pelo disparador acoplado à garra. Isso permite correções e somente então todos os pregos são disparados, seguindo seu posicionamento algoritmicamente determinado. Em alguns casos é preciso aparar arestas e para isso, o robô troca automaticamente o *end effector* por uma serra de disco. Os 3 eixos de articulação do pulso permitem realizar o corte na angulação específica. Antes de seguir para a nova camada de sarrafos, o robô checa a posição e condição de cada nó através de documentação fotográfica, checando desvios e possíveis erros. Fabricação de peças e montagem são realizadas simultaneamente, configurando mais um avanço na integração de processos. Uma grande vantagem, além da aceleração do processo, está na redução da logística necessária para a montagem, sendo desnecessária a marcação das peças e o seu mapeamento para posterior montagem. As 168 peças treliçadas já saem prontas para o canteiro de obras, onde são unidas em duplas e içadas por grua até a cobertura. São então posicionadas sobre vigas curvilíneas de aço (Imagens 79 e 80). Essas peças treliçadas recobrem a estrutura de aço vencendo um vão de aproximadamente 14.7m, pareadas por uma extensão de 28.8m¹³³ (Imagens 81 e 82).



Por se tratar de uma superfície de dupla curvatura, não seria simples recobri-la com painéis, e como a própria densidade da estrutura cria uma superfície contínua, o isolamento e a impermeabilização são feitos com mantas, sem a necessidade de chapas. Internamente, as cordas inferiores das treliças ficam aparentes, e suas camadas alternadas são controladas para acomodar elementos como luz, combate a incêndio e *shafts* de iluminação natural e exaustão.

Para entender em sua completude os avanços alcançados por esse projeto, vamos em direção à sua trajetória investigativa (ver Anexo 3). O início dessa pesquisa de fabricação robótica de estruturas complexas de madeira se deu em 2008, quando o material-base deixou de ser padronizado (tijolo) para ser diferenciado (sarrafo). O projeto de ensino **The Sequential Wall**¹³⁴ (2008) produziu 7 modelos em escala real utilizando sarrafos genéricos de madeira individualmente cortados em comprimento e ângulo. Para se obter a disposição ritmada de sarrafos verticalmente na parede, a lógica de fabricação foi produzir o módulo rotacionado 90°, deitado no plano do chão, e quando pronto, “desvirá-lo”. Nesse estudo já se percebe como superfície de fundo e da frente estão intimamente relacionadas através de negociações da forma (GRAMAZIO, 2014a, p. 144-157). Com essas questões dominadas, foi proposto em seguida, o **The Opening (2008-2009)**, estudo de como as aberturas podem ser forças direcionadoras do design, e de como se dá a relação entre as camadas de sarrafo e questões estruturais de

Imagem 82: Resultado final da superfície no interior do edifício com variações de densidade. Fonte: ETH.

134 Ver <https://vimeo.com/69255580>.

fenestração, como peitoril e verga.

A etapa seguinte foi dominar essas relações no espaço, através de estruturas de cobertura que, apesar de serem compostas por elementos individuais, em malha se comportam como uma superfície ativa. Em **The Sequential Structure**¹³⁵ (2010) foram produzidos estudos em escala e um pavilhão 1:1 no campus da universidade. Seu processo de busca da forma (*form finding*) envolveu a comparação entre modelos físicos em correntes suspensas e a sua simulação em computador. Por ser uma estrutura paramétrica é possível adaptar a espessura do material a requisitos estruturais localizados além de controlar variações da malha para controlar o sombreamento da estrutura de acordo com a orientação solar. Muitos de seus estudos fundamentaram sua posterior aplicação no controle da superfície do Sequential Roof.

O *framework* de trabalho para um design altamente integrado foi ensaiado durante o projeto de pesquisa **Complex Timber Structures**¹³⁶ (2012-2017). Subsidiado pelo SNSF National Research Programme “Resource Wood” (NRP 66), os critérios por trás da pesquisa são de ordem econômica e ecológica em face a uma escassez mundial de recursos energéticos e uma crescente preocupação com as mudanças climáticas. Para isso, investe esforços da automação diferenciada e na integração de processos para a produção de arquitetura em madeira. A integração de fabricação e montagem, eliminando ações humanas intermediárias, gera um fluxo de trabalho muito mais eficiente. Para isso, as questões de precisão e tolerância do material também precisam estar integradas, para então ajustar o projeto e as ações da máquina à realidade material construída. Esse *loop de feedback* é o elemento chave para uma implementação bem sucedida desse processo de fabricação adaptativa (WILLMANN et al., 2017). Grande esforço foi depositado também na investigação da montagem de estruturas espaciais e suas junções em ângulo, que teve um desdobramento para estruturas em aço no projeto de pesquisa **Robotic Lightweight Structures (em andamento)**. Aqui o método de junção é nitidamente mais próspero (solda) que os intrincados processos de união espacial da madeira em ângulos diversos, vistos em Complex Timber Structures (2012-2017).

Vemos uma nítida evolução da complexidade da pesquisa, onde um processo dominado serve como base para a evolução no projeto seguinte, culminando na alta complexidade vista no Sequential Roof. A partir do Complex Timber Structures a pesquisa ganha corpo e tem como foco a investigação da aplicação direta do robô na indústria da construção através de processos computacionais. Seu impacto é direcionado a um cenário mais amplo do campo prático da arquitetura. A pesquisa nessa área continua com o **Spatial Timber Assemblies**

135 Ver <https://vimeo.com/69254738>.

136 Ver <https://vimeo.com/96060053>.

(em andamento), em parceria com a empresa ERNE AG Holzbau, responsável também pela fabricação do Sequential Roof.

A principal questão do trabalho desenvolvido pela dupla se revela fundamentalmente sobre a automação de uma produção diferenciada, através do uso do robô. A automação, que já foi conquistada há décadas pela indústria através das máquinas de controle numérico, agora vai um estágio adiante com a pesquisa desenvolvida pelo laboratório e seus parceiros da indústria. A racionalização padronizada da arquitetura que se mostrou falida, agora é retomada a partir de um panorama diferenciado permitido pelo design computacional e pela natureza não específica do robô. O grupo defende o uso da automação para além do aumento da produtividade e eficiência, mas para a criação de elementos inteiramente novos para a arquitetura, impossíveis de serem criados e realizados sem a computação (WILLMANN et al., 2017).

Em suas descrições e divulgações de projeto, as implicações do processo de fabricação e materialização se encontram em posição de maior destaque que o processo de design da forma. O design computacional é explorado direcionado para a sua viabilidade material. Isso explicita a visão do grupo sobre a própria disciplina quando afirmam que “a razão de ser da arquitetura é a sua realização física concreta” (GRAMAZIO, 2014a, p.381). O processo de concepção do design é muito mais técnico direcionado para a viabilização de um processo de produção, da materialização do digital. Isso requer novas ferramentas de design, modelos personalizados de cálculos para análise estrutural e processos de fabricação totalmente automatizados e personalizados, um novo campo em desenvolvimento denominado Robotic Timber Construction (RTC) (WILLMANN et al., 2016).

Diante dos desafios globais por condições e processos mais sustentáveis, está havendo um resgate da construção com madeira com o auxílio das tecnologias digitais. Estas permitem renovar o olhar e a abordagem sobre o material, revelando novos potenciais. Muitos arquitetos passam a denominar seus processos de design de consciência material (*material aware*), nos quais características materiais passam a ser computadas no processo, e direcionam o design. A madeira empregada no projeto The Sequential Roof é considerada simples para os padrões europeus, onde as normas de construção com madeira e de avaliação do material são bem desenvolvidas, bem como o controle de seu processamento (COUTINHO, 1999). O sarrafo empregado não é bruto, mas industrializado. É composto por duas camadas de madeira sólida coladas, e com junções do tipo dedos formando peças de 10m de comprimento¹³⁷. São aplainadas, sem acabamento, e com a sua umidade reduzida a 10%. O baixo teor de umidade é importante para

137 Do original: “50mm thick, two-layer glued softwood, with planks cut on a split-heart basis (...) produced in the form of 10-metre long finger-jointed, untreated, planed slats, with reduced moisture” (APOLINARSKA et al., 2017, p. 49).

evitar deformações inesperadas nas peças, já que seu comportamento natural de dilatação e contração perpendicular à fibra foi levado em consideração. Ao longo das 23 camadas de sarrafo essas deformações se acumulam, e por isso foi previsto um espaçamento de 15mm entre as peças treliçadas.

Sua classe de força é C24, atendendo a padrões normativos suíços (APOLINARSKA et al., 2017). Essa força é estabelecida através de um processo de análise maquínico (*machine strength grading*) que analisa, dentro de uma mesma espécie de madeira, sua variação de dureza de acordo com sua densidade e incidência de nós, que influenciam drasticamente em sua performance. Em uma era computacional, é possível alcançar maior rigor na classificação das madeiras, alçando esse material a um patamar de padronização comparável aos materiais industriais. A empresa dinamarquesa Metsä, por exemplo, utiliza tecnologia de escaneamento para determinar algoritmicamente o melhor padrão de corte de cada tronco. Em um futuro permeado por big data, será possível talvez, receber informações digitais relativas às madeiras adquiridas junto a essas madeireiras. O material acompanhado de sua informação digital permitirá a aplicação de informações de porosidade e nós dentro do processo de design materialmente consciente (MENGES et al. , 2017a, p. 6).

Vemos neste projeto do grupo Gramazio Kohler Research uma maneira de utilizar a madeira, processada e altamente controlada, enquadrada a padrões industriais. Uma postura diametralmente oposta é vista mais à frente no projeto Woodchip Barn, da AA School, onde troncos brutos são empregados em sua estrutura, tomando partido de suas bifurcações naturais. Trata-se de outra abordagem à essa consciência material, da qual Achim Menges também fala, através de uma terceira abordagem. Diferente da padronização buscada pelo processamento da madeira, também é possível através do computacional considerar características intrínsecas da madeira como a higroscopia¹³⁸ e a anisotropia¹³⁹. Essa abordagem da matéria ativa capaz de criar arquiteturas interativas às condições ambientais ainda se encontra em fase experimental e embrionária, mas aponta para um cenário futuro possível. Diante desse panorama de possibilidades, seguimos para o segundo grande laboratório desenvolvendo pesquisa no campo do design computacional e da fabricação robótica.

138 Higroscopia é a propriedade que certos materiais possuem de absorver água do ambiente. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Higroscopia>

139 Anisotropia é uma característica de uma substância ao possuir variação de certa propriedade física de acordo com a direção. A madeira, por exemplo, é um material anisotrópico com propriedades mecânicas que dependem da disposição das suas fibras. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Anisotropia>

3.4.2 Institute of Computational Design and Construction – University of Stuttgart

O ICD- Institute of Computational Design and Construction, fundado em 2008, é dirigido por Achim Menges (1975). Professor na University of Stuttgart, é também professor visitante na Harvard University's Graduate School of Design desde 2009, dentre outras universidades na Europa e nos Estados Unidos. Menges é formado pela AA School de Londres, onde começou sua carreira de docente. Em colaboração com o ITKE-Institute of Building Structures and Structural Design, dirigido por Jan Knippers, desenvolvem pavilhões anuais, os ICD/ITKE Research Pavilions, que demonstram sua maestria em performance material, estrutural e espacial através de novas abordagens de design integrativo. Sua pesquisa como um todo “Explora a reciprocidade entre material e computacional na arquitetura, e as múltiplas e profundas inter-relações entre tecnologia, biologia e cultura.” (MENGES, 2015a).

Menges tem sido convidado pela Architectural Design desde 2004 a editar revistas a respeito de suas pesquisas. As duas últimas mais significativas para o recorte desta pesquisa são *Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*, de 2012, e logo após a edição da dupla Gramazio e Kohler, lança *Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational*, em 2015. O direcionamento do editorial e a diversidade de seus convidados já deixa clara a diferença entre as abordagens desses pesquisadores ao utilizarem as mesmas tecnologias de design e fabricação. Enquanto um direciona para a produção industrial e a automatização de processos diferenciados, explorando as ferramentas e seus novos ambientes de trabalho, ao outro interessa o diálogo recíproco entre matéria e tecnologia, onde o design considera a natureza viva da matéria através de um processo exploratório informado.

Além dessas publicações, Menges possui no total 17 livros publicados, mapeados no **Anexo 2**, 146 artigos acadêmicos e 119 capítulos e artigos em livros. Seus projetos desenvolvidos dentro do ICD estão mapeados no **Anexo 4**, pois faremos constantes referências a outros projetos que precederam e contribuíram para a consolidação das abordagens estudadas através de dois de seus projetos.

O Landesgartenschau Exhibition Hall, que veremos a seguir, foi a primeira casca de superfície-ativa segmentada produzida em chapas de madeira compensada como estrutura. Um feito possível apenas através da integração de diversas áreas do conhecimento em um ambiente computacional de simulação e modelagem. Em seguida, veremos o Elytra Filament Pavilion, um sistema compósito de filamentos tramados pelo braço robótico, que vem sendo desenvolvido pelo laboratório desde 2012, e encontra neste pavilhão seu aprimoramento para aplicações práticas, após percorrer diversas abordagens. Nesse

processo, se antevê uma nova espacialidade do futuro, diferente de todas as tipologias convencionais da arquitetura. As explorações realizadas pelo ICD almejam não apenas transformar o futuro da construção através de novos processos, mas o próprio futuro da disciplina da arquitetura integrada à tecnologia.

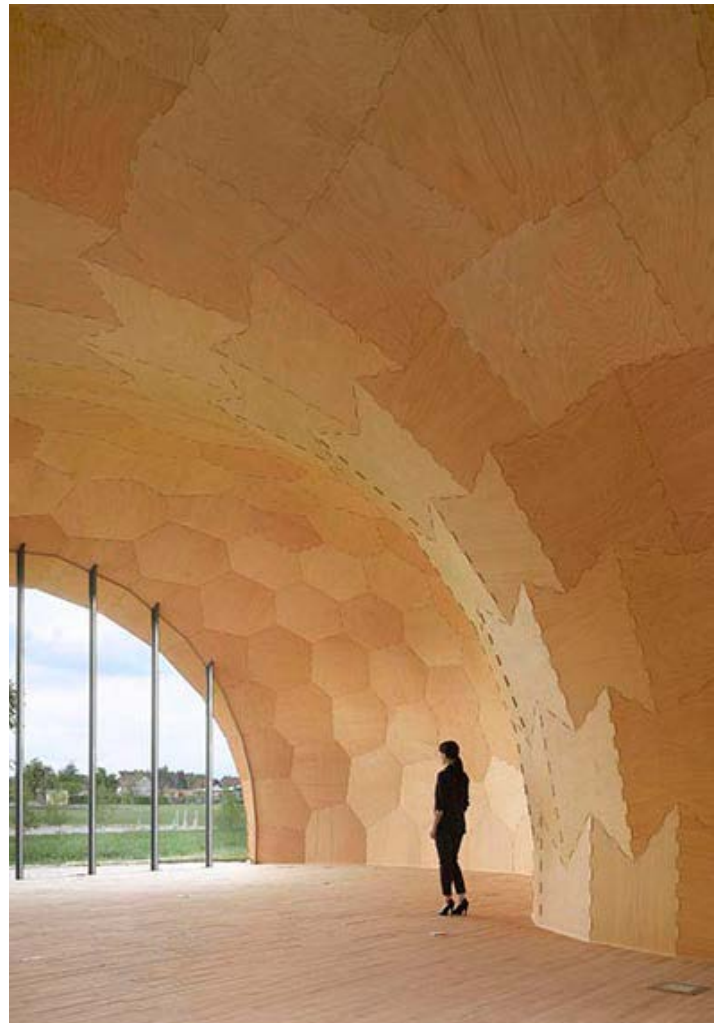
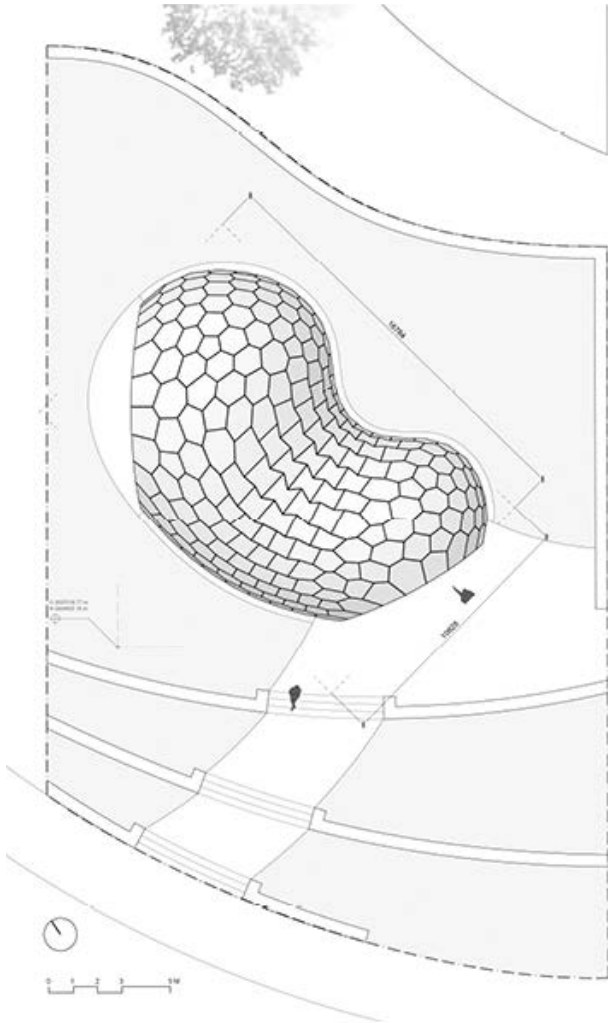
Landesgartenschau Exhibition Hall, Schwäbisch Gmünd, Alemanha, 2014

Casca leve segmentada de madeira

Para o projeto do Landesgartenschau Exhibition Hall¹⁴⁰, uma estrutura leve de placas de madeiras (*plate structure*), um novo método de design computacional e fabricação digital foi desenvolvido. Trata-se de um protótipo em grande escala de uma estrutura em casca de superfície-ativa segmentada, e por isso cheia de desafios em sua execução. O projeto de pesquisa foi realizado no âmbito da Robotics in Timber Construction, um projeto interdisciplinar, financiado pela União Européia e diversos outros grupos, com objetivo de transferir conhecimento de pesquisa para a prática. É resultado de um trabalho em conjunto entre o ICD - Institute for Computational Design, o ITKE - Institute of Building Structures and Structural Design e o IIGS - Institute of Engineering Geodesy da Universidade de Stuttgart. Sua equipe composta por especialistas em diferentes domínios, como design de arquitetura, engenharia estrutural, fabricação robótica e geodésica, trabalhou integradamente desde o início. O pavilhão permanente foi projetado para abrigar exposições de horticultura e paisagismo, e também para ser usado em eventos, com as instalações necessárias para tal. Com 125m² de área útil e 245m² de superfície, sua forma possui dois domos conectados por uma contração, são dois espaços elípticos interligados por um espaço hiperbólico. Essa variação de curvatura da geometria produz um padrão diferenciado de contorno de seus componentes, encontrado através da programação de sua forma (Imagem 83).

O visitante penetra o volume pelo domo menor, onde encontra a área de recepção, que se desenvolve em uma leve contração do espaço para expandir novamente no salão de exposições. Com 6m de altura em sua maior porção, o volume é cortado por um pano de vidro por onde se descortina a paisagem do parque onde está localizado (Imagem 84). Sua estrutura primária foi roboticamente fabricada em chapas de madeira compensada de 50mm de espessura, que suporta todas as camadas subsequentes, demonstrando a eficiência do sistema. Isto só foi possível pela implementação de métodos computacionais integrados de concepção, simulação, fabricação e aferição, que descortinam novas possibilidades à arquitetura de madeira. Out-

140 Ver <https://vimeo.com/98518748>.



ra questão importante para o projeto tratou de seu impacto regional, pois todo o seu ciclo, de colheita, processamento, projeto, fabricação e construção está dentro de um raio de 200km. Este tipo de projeto, além de ter baixa energia incorporada em seu processo, fortalece cadeias regionais não apenas em seu aspecto econômico, mas ecológico e social (SCHWINN, 2017, p. 114).

A inspiração do design veio do mundo biológico já que a diferenciação morfológica encontrada na natureza é extremamente propícia para a aplicação em designs baseados em comportamentos localizados e que buscam a otimização e performance da estrutura. A emergência da forma através de estratégias morfogenéticas e de design morfo-ecológico, que se baseia não apenas nas formas, mas nas relações naturais, estão presentes na produção acadêmica de Menges desde o início. A partir da biomimética, Menges foi construído seu discurso de design integrado, onde matéria e sistema têm papel fundamental na definição da arquitetura. As bolachas-do-mar são organismos modulares formados por placas de carbonato de cálcio unidas por projeções microscópicas de suas arestas, um intertravamento de suas bordas similar às junções empregadas em marcenaria tipo dedos (Imagem 85). Dessas junções elaboradas pela natureza para um intertravamento de placas veio o conceito de trabalho para a criação da primeira

Imagem 83: Planta de situação. Landesgartenschau Exhibition Hall, 2014. Fonte: ICD.

Imagem 84: Vista interna do pavilhão, com padronagem diferenciada das placas de madeira. Fonte: ICD.

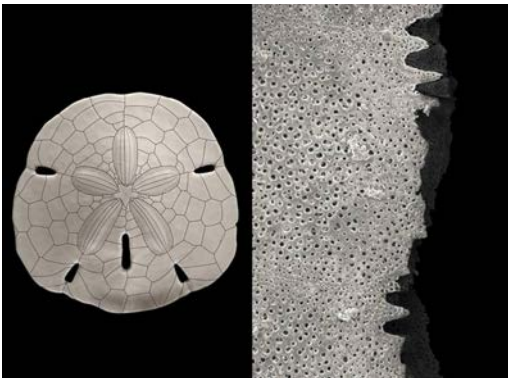
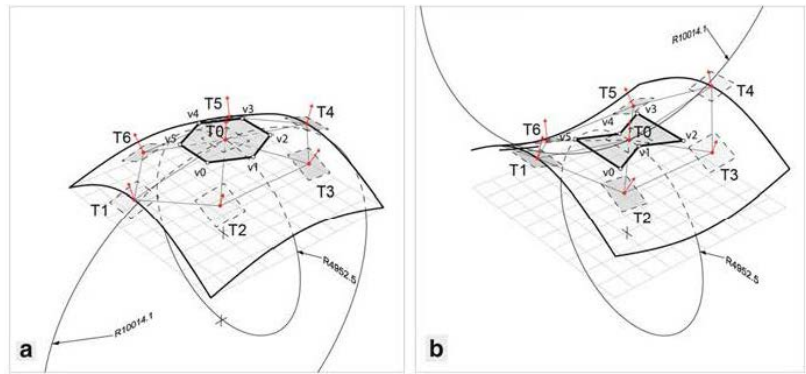


Imagem 85: Princípio biomimético inspirado na bolachas-do-mar e suas microscópicas conexões. Fonte: ICD.

Imagem 86: Planos de intersecção da superfície de dupla curvatura. Superfície sinclástica de curvatura Gaussiana positiva e superfície anticlástica de curvatura Gaussiana negativa. Fonte: KRIEG et al., 2014.



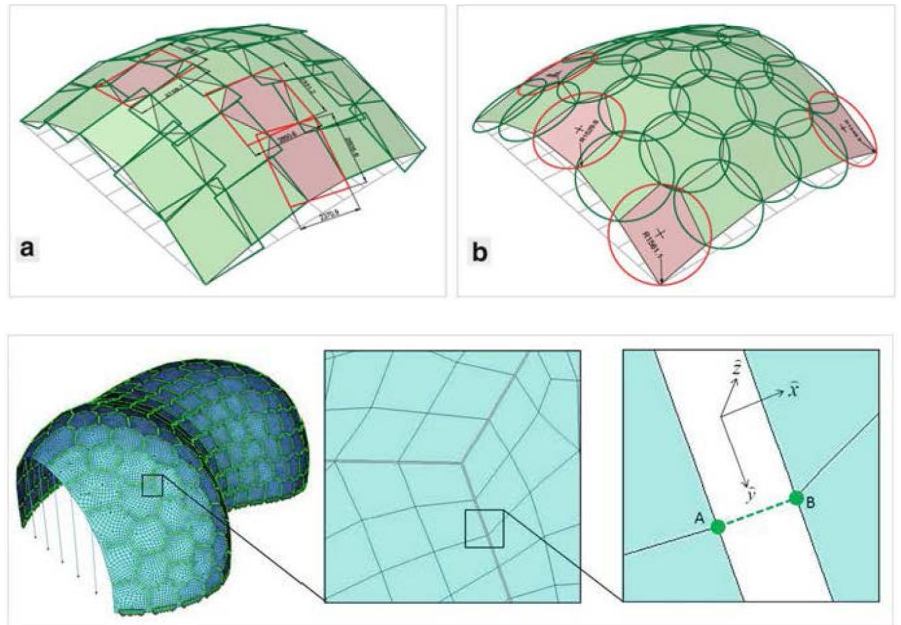
casca estrutural segmentada realizada em madeira. Esse processo só foi possível através de métodos avançados de design computacional e simulação.

A metodologia de trabalho desenvolvida nesse projeto de pesquisa considera características do material e parâmetros de fabricação como agentes geradores do design, um processo de design baseado em agente (*agent-based design*). Diferentemente dos processos tradicionais baseados em conhecimento (*knowledge-based design*), aqui, o **processo de design** permite a interação entre questões que se encontram em extremos opostos do espectro de planejamento. São muitos os requisitos conflituosos que as novas tecnologias de projeto abarcam em um diálogo entre programa, geometria, estrutura, junções, fabricação, montagem, requerimentos de qualidade e regulação da construção. Todas essas questões informam a negociação do design no meio computacional.

O modelo baseado em agente e simulação (ABMS - *agent-based modelling and simulation*) empregado abarca a complexidade necessária para sua realização. Trata-se de um tipo de inteligência artificial baseada em comportamento. Esse método considera indivíduos dentro de um sistema, como um cardume de peixes, por exemplo, e permite a modelagem e simulação de um grande número de elementos autônomos que interagem entre si. Os resultados dessa interação estão além da capacidade humana de computar informações e podem resultar em formas emergentes da auto-organização (SCHWINN e MENGES, 2015).

O projeto do Landesgartenschau Exhibition Hall partiu de regras pré-definidas, mas flexíveis, onde foram estabelecidos padrões de comportamento, o que, por exemplo, controla a distância de um agente para o outro, definindo o tamanho e a forma de cada placa em relação às propriedades da superfície de dupla curvatura subjacente. A partir de planos que tangenciam a geometria, cada elemento da casca teve sua posição e orientação calculados em respeito aos vizinhos imediatos e à geometria global. Enquanto a forma de cada placa é definida pela curvatura Gaussiana da superfície¹⁴¹ (Imagem 86), seu tamanho é

141 Curvatura Gaussiana é um parâmetro local da superfície que avalia sua curvatura. O hiperbolóide possui uma superfície de curvatura gaussiana negativa, enquanto o cilindro



definido por parâmetros globais e locais. Os parâmetros globais dizem respeito à quantidade média de placas na subdivisão da superfície, e seu tamanho médio, enquanto os parâmetros locais, que realmente governam o comportamento simulado do agente, são definidos pelo material usado, o tamanho das placas de compensado disponíveis e a área de trabalho do braço robótico (Imagem 87) (KRIEG et al., 2014). Trata-se de um processo estereotômico de subdivisão de uma forma global, o cálculo computacional do corte de um sólido informado também através de cálculo.

Esse processo exploratório é iterativo e por isso assertivo em sua definição, onde milhares de possibilidades são testadas na tela do computador até encontrar aquelas que se adequam aos critérios estabelecidos. O design é buscado dentro de um espaço morfológico¹⁴² que inclui parâmetros de fabricação, princípios biomiméticos e critérios estéticos. (SCHWINN, 2017, p. 122) Essa abordagem permite a emergência de uma arquitetura verdadeiramente performativa e sustentável, que está diretamente relacionada aos parâmetros inseridos. Os agentes podem buscar dentro do espaço morfológico de design e fabricação a melhor solução para determinados critérios de performance selecionados, através de seu comportamento definido. O designer passa a ser o direcionador desses critérios à medida que escolhe as questões relevantes para cada projeto.

Paralelamente a esse processo exploratório da forma, foi desenvolvido o detalhamento da junção das placas. Por se tratar da parte mais sensível do sistema, uma vez que a resistência do material é descontinuada, a qualidade dessas junções influi diretamente na capacidade da casca de suportar cargas. Esse estudo contou com

Imagem 87: Limitações de fabricação como agentes de design: retângulo de contorno do material disponível e círculo da área de trabalho do robô. Fonte: KRIEG et al., 2014.

Imagem 88: Modelo de elementos finitos e forças atuantes nos nós: na direção x ocorrem as forças axiais e de momento, na direção y forças de cisalhamento no plano e na direção z forças de cisalhamento fora do plano. Fonte: KRIEG et al., 2014.

possui uma superfície de curvatura gaussiana zero e a esfera, positiva. https://pt.wikipedia.org/wiki/Curvatura_gaussiana

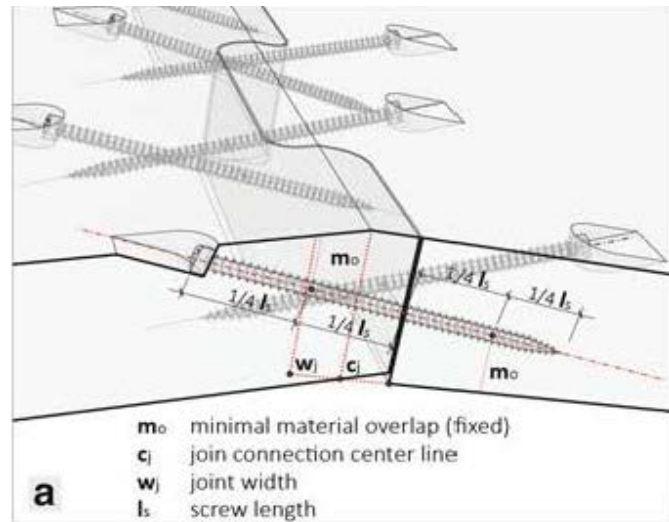


Imagem 89: Forças atuantes nas junções. Fonte: KRIEG et al., 2014.

Imagem 90: Detalhamento da conexão em junção tipo dedos. Fonte: KRIEG et al., 2014.

a experiência anterior do ICD/ITKE Research Pavilion 2011, e avançou no sentido de controlar o conjunto de forças atuantes nas junções. Foi preciso um maior rigor em seu design, uma vez que a investigação tem como objetivo sua aplicação prática na indústria da construção com madeira e por isso, deve atender às normas reguladoras.

Testes físicos dessas junções juntamente com parafusos em diversas angulações foram realizados para informar o modelo de elementos finitos (MEF) para análise estrutural (Imagem 88). Este modelo de linhas e nós deriva do modelo de design, e continua a ele integrado para que um fluxo de *feedback* contínuo e automatizado seja estabelecido. Nesse modelo, foram simuladas as forças atuantes nas junções, as forças axiais de tração e compressão, forças de cisalhamento, o momento no plano e o momento fora do plano, que gera o empenamento da placa. As forças utilizadas no modelo estrutural (*springs*) são baseadas nos valores encontrados nos testes físicos. As forças de cisalhamento são transferidas para o plano da placa de madeira a partir do contato lateral das superfícies das junções, e para isso é preciso ter um correto dimensionamento de sua espessura para contato e sobreposição. As forças axiais, bem como forças fora do plano que geram um momento na superfície da placa são bem menores e foram resolvidos com o uso dos parafusos cruzados, cuidadosamente angulados e dimensionados (Imagem 89). Os parafusos também foram especificados seguindo normas da construção em relação à sua área de sobreposição, e servem como uma armadura interna da junção (Imagem 90) (KRIEG et al. 2014, p. 116). Outro aspecto relativo à produtividade e à montagem é a adoção de um detalhamento integral para todas as placas, eliminando complexidades desnecessárias que seriam processadas pelo homem em fases subsequentes.

As 243 placas diferenciadas de compensado que formam a estrutura foram então definidas através do modelo computacional, bem como suas camadas adjacentes de isolamento, impermeabilização e revestimento. O **processo de fabricação** foi transferido para uma ofici-



na de madeira, saindo do ambiente de laboratório para também testar sua aplicabilidade em um fluxo de trabalho real. As chapas de compensado de faia foram previamente usinadas em uma máquina CNC para extrair sua forma com margens laterais de sobra. Aqui, a otimização seguiu o aproveitamento máximo da chapa, e seus restolhos foram transformados em parquet de piso a ser aplicado no pavilhão. Em seguida, as peças foram usinadas pelo braço robótico em uma configuração de 7 eixos com uma mesa giratória, para abarcar a multiplicidade de ângulos de corte de suas bordas e furação para os parafusos (Imagens 91 e 92). Além disso, cada peça conta com uma furação que serve como guia no processo de montagem. A flexibilidade cinemática do robô industrial é um requisito essencial para a produção de geometrias complexas e singulares, que não poderiam ser produzidas de outra forma. As camadas adjacentes de isolamento, impermeabilização e revestimento também foram digitalmente fabricadas na máquina CNC, e todo material foi organizado seguindo a lógica de montagem. O processo de fabricação levou 3 semanas.

Durante essa etapa, um levantamento cuidadoso foi realizado para verificar as tolerâncias de fabricação e comportamento do material (Imagem 93). Durante a modelagem de elementos para fabricação digital, a tolerância de fabricação geralmente é considerada para abarcar variações do material, imprecisões da fabricação e montagem. Um espaço intersticial entre os elementos facilita a montagem, mas precisa ser dosado para preservar a integridade do sistema. Neste caso, a integridade estrutural do sistema depende de uma tolerância próxima à zero das junções, onde os dentes adjacentes precisam de um firme contato para transferir as cargas entre as placas. A essa negociação, precisa ser adicionada a suscetibilidade do material de empenamento sob mudança das condições ambientais. Utilizando uma ferramenta de medição a laser de alta precisão, algumas peças estratégicas foram medidas logo depois de sua usinagem, antes de saírem para o canteiro de montagem, e logo antes de serem posicionadas na estrutura. Sem variações significativas decorrentes de mudanças ambientais, a pre-

Imagem 91: Cabine de fabricação robótica. Fonte: ICD.

Imagem 92: Detalhe da fabricação da conexão em junção tipo dedos. Fonte: ICD.



Imagem 93: Aferição a laser das placas fabricadas para controle de precisão e comportamento do material. Fonte: ICD.
Imagem 94: Montagem das placas sobre esqueleto em madeira. Fonte: ICD.
Imagem 95: Sobre as placas de 50mm vão as camadas subsequentes: barreira de vapor, aglomerado de madeira 35mm, borracha de impermeabilização EPDM, sarrafos e revestimento em chapas de madeira compensada tratada. Fonte: ICD.



cisão de fabricação verificada foi de 0.42mm, para um limite inicial estabelecido em 0.5mm. Um controle de qualidade também será aplicado ao edifício construído, para, através de escaneamento 3D, realizar uma análise do comportamento da estrutura a longo prazo. Esse controle de precisão servirá para regulamentar padrões de qualidade para estruturas futuras, e tem encontrado valores extremamente baixos em comparação à construção convencional com madeira (SCHWINN, 2017, p. 120).

A montagem e finalização do edifício consumiu 4 semanas (Imagens 94 a 96). As cascas segmentadas estão em grande vantagem em relação às cascas contínuas quanto à sua produtividade. Além de não demandarem fôrmas que representam uma segunda casca a ser descartada, sua pré-fabricação permite um alto nível de controle dentro da oficina, e uma montagem de forma limpa, utilizando um esqueleto de suporte em andaimes, com pouca demanda de mão de obra (SCHWINN et al., 2015). O resultado final tem sua estrutura portante como superfície interna do edifício, apresentando um jogo de reflexão de luz a partir da diversidade de angulação de suas placas. Além disso, as junções tipo dedo permanecem aparentes revelando seu intrincado sistema de encaixe. Assim, os princípios de construção derivados da diferenciação geométrica dos sistemas biológicos per-



manecem visíveis e fazem parte da experiência arquitetônica (ICD).

Imagem 96: Pavilhão finalizado. Fonte: ICD.

Os experimentos de Menges com madeira começam em 2009 em projetos de ensino dentro do ICD, mas com antecedentes em outras universidades. As abordagens investigativas são muitas, explorando as capacidades morfológicas da madeira através da sua higroscopia, aplicando padrões de corte para sua deformação elástica em chapas, ou utilizando a técnica de *kerfing* para dobrar peças robustas, análise da microestrutura de madeiras de lei para sua otimização, aplicação de vapor para deformações plásticas de estruturas em rede, e cascas de madeira laminada diferenciadas em sua espessura e capacidade elástica, são alguns exemplos de sua multiplicidade exploratória (ver Anexo 4). A primeira vez que todo esse conhecimento foi aplicado de forma integrada na produção de um pavilhão foi em 2010, com o **ICD/ITKE Research Pavilion 2010**, uma superfície ativa através da elasticidade das lâminas finas de compensado. Sua estrutura demonstra os avanços alcançados através de processos computacionais de design e simulação, orientados ao material e sua fabricação. No entanto, para sua produção, o braço robótico foi empregado da mesma maneira que uma máquina convencional CNC poderia ser empregada, utilizando apenas 3 eixos de trabalho e sem a conectividade entre físico e digital que o robô permite (BONWETSCH, 2015). A partir daí, sua pesquisa

com madeira se desenvolve em três linhas nítidas, uma explorando a capacidade elástica de lâminas finas de madeira (ICD/ITKE Research Pavilion 2010, ICD/ITKE Research Pavilion 2015-16, ICD Sewn Timber Shell 2017), outra explorando as capacidades higroscópicas do material para criar arquiteturas interativas com as condições do meio (HygroScope: Meteorosensitive Morphology, HygroSkin: Meteorosensitive Pavilion), e a terceira que nos interessa mais, sobre cascas estruturais de placas de madeira (ICD/ITKE Research Pavilion 2011, Landesgartenschau Exhibition Hall, Segmented Timber Shell, BUGA Wood Pavilion 2019).

Foi no **ICD/ITKE Research Pavilion 2011**¹⁴³ que surgiu a inspiração na estrutura morfológica da bolacha-do-mar para realizar uma estrutura em placas. No sistema, o próprio encaixe é a junção dos elementos, sem a necessidade de outro componente. No processo de design computacional, além da heterogeneidade das células e a anisotropia do material, foi proposta uma hierarquia em sua estrutura, composta por duas camadas de madeira compensada espaçadas, formando módulos espaciais. Esses módulos tridimensionais são formados por placas finas de madeira coladas, de apenas 6.5mm, e são posteriormente unidos por parafuso. Foi essa experimentação que serviu de teste para o desenvolvimento de uma estrutura permanente consolidada três anos mais tarde, com o Landesgartenschau Exhibition Hall.

Posteriormente foi desenvolvido um pavilhão interno para a mostra Baubionik – Biologie Beflügelt Architektur, o **Segmented Timber Shell (2017)**. Trata-se de uma estrutura em casca segmentada com apenas 20mm de espessura que cobre um vão de 7m. O próprio trabalho colaborativo entre arquitetos, engenheiros e biólogos para o seu desenvolvimento fez parte da mostra. Previstos para 2019, o laboratório está desenvolvendo dois pavilhões de estrutura leve, um em madeira, e o outro em fibra composta, nosso próximo tema de análise. Financiada pelo Estado alemão de Baden-Württemberg, pólo de incentivo à produção de estruturas leves e biomiméticas, através da fabricação digital, a mostra abrigará o **Buga Wood Pavilion 2019**, uma estrutura ousada cobrindo um vão livre de 25m. Seus 400 elementos diferenciados retornam à lógica de célula espacial vista no pavilhão de 2011, tomando partido da rigidez que ela garante ao sistema de junções em dedo (ICD).

Vemos ao longo do desenvolvimento da pesquisa que o rigor da fabricação digital, associada a métodos computacionais de design, simulação e levantamento, permitem um trabalho interdisciplinar integrado direcionado à exploração material e à performance. O resultado dessa síntese entre características materiais, design computacional e fabricação robótica permite a realização de estruturas de madeira que estão fora do escopo tradicional da arquitetura e dos protocolos

143 Ver <https://vimeo.com/73707953>.



de produção (SCHWINN, 2017). São limites da disciplina em expansão, através de novas lógicas de design e produção, que estão permitindo emergir uma nova cultura material. Tanto o Landesgartenschau Exhibition Hall como o The Sequential Roof são experimentos orientados para sua aplicação prática na indústria da construção com madeira, mostrando que esse setor é o mais receptivo para a implementação dessas tecnologias computacionais de produção.

Imagem 97: Elytra Filament Pavilion, Victoria & Albert Museum, 2016. Fonte: ICD.

Elytra Filament Pavilion, Victoria and Albert Museum, Londres, Inglaterra – 2016

Estrutura filamentar compósita

O Elytra Filament Pavilion formula a síntese de um processo investigativo conduzido desde 2012 pelo laboratório, quando apresentou seu primeiro pavilhão nesse sistema. Em 2016, o ICD juntamente com o ITKE apresentam uma instalação no Victoria & Albert Museum de Londres, um demonstrativo que extrapola o campus universitário para divulgar uma nova cultura material (Imagem 97). Trata-se de uma superfície modular de cobertura, composta por 40 módulos tramados em material compósito de fibras, suspensos sobre 7 colunas, também tramadas. O projeto foi desenvolvido no âmbito do programa V&A's Engineering Season com intuito de dar visibilidade à engenharia que torna possível o mundo construído. O pavilhão veio para extrapolar conceitos estabelecidos, unindo engenharia estrutural, engenharia ambiental e engenharia de produção de ponta no desenvolvimento de uma nova arquitetura. Permaneceu em seu jardim interno de maio a novembro de 2016, com 200m² inicialmente e chegando a 220m² ao fim da mostra. Isso se deve à sua capacidade expansiva integrada à

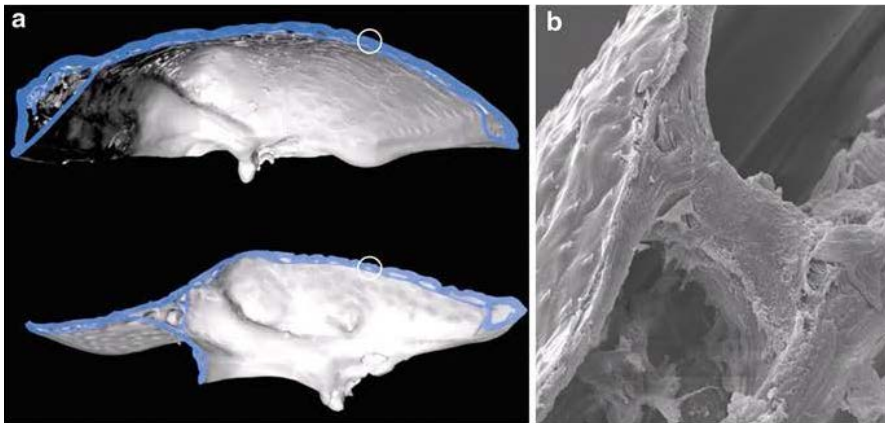


Imagem 98: Imagens de élitros de besouros, por tomografia micro computadorizada (Micro CT) e microscópio eletrônico de varredura (SEM scan). Fonte: PARASCHO et al, 2014.

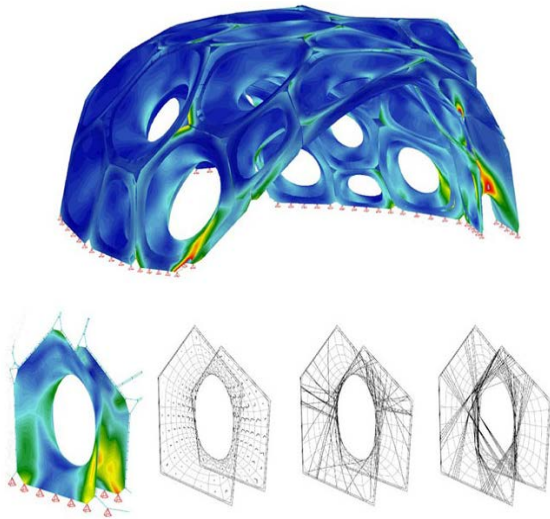
instalação, que contou com um braço robótico sob o dossel produzindo novos componentes a serem acoplados à estrutura. Sensores integrados às fibras coletavam dados anônimos de ocupação do espaço, bem como de informações ambientais de umidade, temperatura e vento, a serem inter cruzados na geração de novos padrões para a trama de seus novos componentes. Esse projeto dá um salto em escala em relação aos experimentos anteriores, bem como em relação à integração de sistemas componentes da cobertura, saindo do campo experimental para entrar no campo prático da construção. No ano seguinte, foi apresentado na mostra *Hello, Robot. Design between Human and Machine*, no Vitra Design Museum, na Alemanha, dentro de um vasto panorama de aplicações e implicações do robô (ICD).

Inserido em um contexto onde a cultura e vivência dos espaços livres é sazonal e extremamente valorizada, o pavilhão traz um vislumbre de uma futura ocupação dos espaços com estruturas sensíveis às condições locais e temporais, que podem responder expandindo e contraindo. Os objetivos do laboratório ao desenvolver esse campo de pesquisa de fabricação aditiva com compósitos se mostram ambiciosos ao explorar o potencial dessa técnica. Sendo utilizada na indústria há bastante tempo, esse processo denominado Enrolamento Filamentar Contínuo (*Filament Winding*)¹⁴⁴ realiza a automação de processos de fabricação com fibra de tanques e estruturas volumétricas sem a utilização de fôrmas. O ICD o emprega explorando seus limites estruturais e formais, enquanto almeja enquadrar esse processo na indústria da construção, saindo do campo exploratório para a produção efetiva de novas arquiteturas possíveis, uma nova tectônica.

Sua abordagem, assim como no projeto visto anteriormente, partiu da integração entre arquitetura e engenharia através da biologia. Esse novo sistema é composto por módulos de fibras de vidro e carbono enroladas e enrijecidas por resina, e que por isso não necessitam de um núcleo estrutural (*coreless*). Foi inspirada na estrutura da carapaça dos besouros, os élitros, do grego *élytron*. A inspiração biomimética para esse tipo de estrutura em carbono vem desde o início, com o primeiro pavilhão de 2012, inspirado na couraça da lagosta, o ICD/ITKE Research

144

Ver <http://coopmaco.com.br/wp-content/uploads/2014/02/Filament-Winding.pdf>.

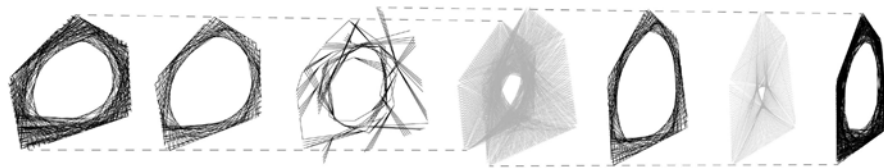
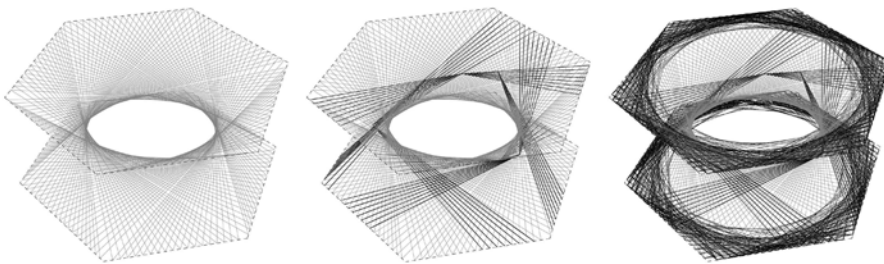
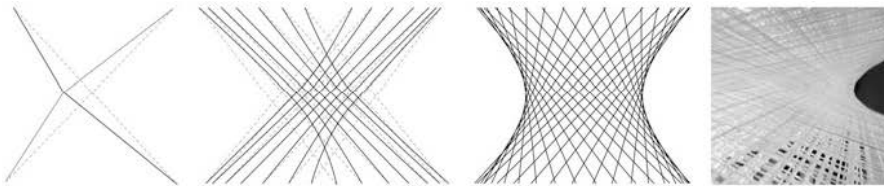


Pavilion 2012. Mas foi em 2013 que a estruturação das fibras passou a ser em dupla camada sem núcleo, através da análise de diversas espécies de besouro que possuem em sua formação tecidos compósitos reforçados por fibra. Utilizando tecnologias microcomputadorizadas foi feita a análise morfológica do tecido em distintas escalas (Imagem 98). No nível macro, se percebe a variação da espessura da estrutura para sua otimização, em um nível médio é possível identificar a variação modular da estrutura, e no nível micro, o direcionamento das fibras. Assim, as regras morfológicas encontradas na natureza foram traduzidas em parâmetros em seu **processo de design** computacional. Nesse momento, tanto o Elytra Pavilion como o ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14 compartilham de uma mesma matriz de pensamento, mesmo que seguindo por caminhos diferentes. Por isso se faz necessária uma aproximação maior entre essas duas obras, para delinear suas escolhas na geração do design e seus resultados diferentes. Enquanto o pavilhão investigativo usufrui de uma liberdade maior por justamente buscar ultrapassar limites do *status quo*, o Elytra Pavilion encontra as limitações dos sistemas arquitetônicos adjacentes ao seu funcionamento e das regulações construtivas. A complexidade formal e processual permitida pelas novas ferramentas vai de um nível experimental ao encontro da arquitetura e seus requisitos programáticos, espaciais, funcionais e normativos.

No pavilhão de 2013-2014, a exploração formal através de um processo de busca da forma (*form-finding*) computou parâmetros bioinspirados como diâmetro máximo, ângulos, altura do módulo, comprimento de suas arestas e a relação com a célula vizinha, a não planaridade e a variação de número de arestas. Por se tratar de uma casca de forma ativa, toda essa diferenciação trabalhou em conjunto para negociar a variação celular encontrada. Seus componentes possuem de 50cm a 250cm de diâmetro, conformando polígonos de 4 a 7 arestas, com diferentes quantidades de pontos de controle para a trama de filamento, ou seja, apresenta uma grande variabilidade (Imagens 99 e 100). Se a produção robótica computadorizada permite um alto grau

Imagem 99: Modelo de elementos finitos do ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14. Fonte: ICD.

Imagem 100: ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14, de forma ativa. Fonte: ICD.



7. Carbon Edge Reinforcement
 4. Generic Carbon
 3. Structurally Differentiated Carbon
 2. Glass Scaffolding
 5. Generic Carbon
 1. Glass Enclosure (optional)
 6. Carbon Edge Reinforcement

Imagem 101: Processo de enrolamento sem núcleo (*coreless winding*) onde as fibras geram tensão umas sobre as outras e um enrolamento helicoidal gera uma curvatura negativa. Fonte: PARASCHO et al., 2014.

Imagem 102: Sintaxe de enrolamento e suas diferentes camadas. Fonte: KNIP-PERS et al., 2016.

de liberdade geométrica na produção de elementos diferenciados, sua adequação a parâmetros reguladores, funcionais e de reprodutibilidade demandam uma redução dessa complexidade. Para o Elytra Pavilion houve o refinamento desse processo, eliminando determinados parâmetros inadequados ao que se pretendia, um sistema adaptável e reconfigurável com componentes estruturais que pudessem ser reorganizados, gerando novas configurações (PRADO et al., 2017). Por isso, ao invés de uma casca estrutural, o resultado final é uma cobertura modular suportada por pilares. Seus parâmetros definidores incluem a planaridade desses módulos, a relação de espessura, definição do polígono através da dimensão mínima da aresta e linha diagonal máxima, ângulo mínimo, e forças de tensão e momento. Chegou-se a uma condição de borda unificada para todo o sistema, um hexágono de 40cm de altura com 2.8m de diâmetro, enquanto a sua variabilidade ficou a cargo dos arranjos das fibras. Uma maior acuidade foi investida no desenvolvimento de sintaxes específicas, adequadas para cada situação, aumentando o desempenho da estrutura.

Na carapaça dos besouros, o desempenho dessa estrutura leve está diretamente relacionado à morfologia geométrica de suas camadas duplas e das propriedades mecânicas do compósito de fibras naturais de padrão variado. As fibras de quitina, de qualidades anisotrópicas, possuem uma distribuição e articulação geométrica de conexão entre as duas camadas altamente diferenciadas em toda a casca do besouro. Os princípios estruturais subjacentes encontrados na natureza foram identificados e traduzidos em regras de design para a geração da morfologia das estruturas. Em sua primeira abordagem, como didáti-



ca de ensino, protótipos em escala com trama manual foram desenvolvidos, seguidos por simulações computacionais de enrolamento e o desenvolvimento das configurações para uma fabricação robótica dos primeiros padrões gerados. Ao estudar o comportamento anisotrópico das fibras em sua distribuição na estrutura dupla, uma sintaxe de enrolamento de fio foi desenvolvida (*winding syntax*), levando em consideração reciprocidades entre material, forma, estrutura e fabricação. Descobriu-se que através desse processo de distribuição das fibras, o designer tem controle sobre o comportamento do material. Através do padrão criado pelas fibras pode-se manipular seu comportamento anisotrópico e conseqüentemente o desempenho do sistema. Quando o ângulo de intersecção entre as fibras é pequeno, a resistência no nó é unidirecional, enquanto vai adquirindo um comportamento isotrópico à medida que o ângulo se aproxima de 90° (Imagem 101) (PARASCHO et al, 2014).

Imagem 103: Diagrama de forças em células de diferentes aberturas. Fonte: PRADO et al., 2017.

Imagem 104: Célula fabricada. Fonte: ICD.

As fibras utilizadas são de duas qualidades, a transparente, de vidro, é macia e leve, além de apresentar qualidades mecânicas e grande durabilidade. A fibra preta, de carbono, apresenta grande resistência e rigidez, comparável ao aço. Por suas qualidades distintas, o emprego das fibras foi diferenciado. Primeiro, as camadas de fibra de vidro geram a forma global do módulo, com variabilidade geométrica e de sua permeabilidade. A distribuição helicoidal dos fios entre os dois quadros da estrutura gera uma superfície hiperbólica, de curvatura negativa, que é reforçada com a aplicação da fibra de carbono de acordo com as demandas estruturais locais. Assim, o sistema adquire rigidez e qualidades estruturais com o reforço de bordas e cruzamentos localizados (Imagem 102) (KNIPPERS et al., 2014).

Para a definição do padrão de enrolamento do fio de carbono foram utilizados dados da análise estrutural feita a partir de um modelo de elementos finitos (MEF). As tensões globais do sistema são mapeadas para cada componente, e transformadas em vetores de força que determinam o padrão de distribuição da fibra para reforço estrutural (Imagem 103). A fibra de carbono permite a adequada transmissão de forças entre os componentes e entre as duas camadas de estrutura de cada componente. Somente após a aplicação da fibra de carbono

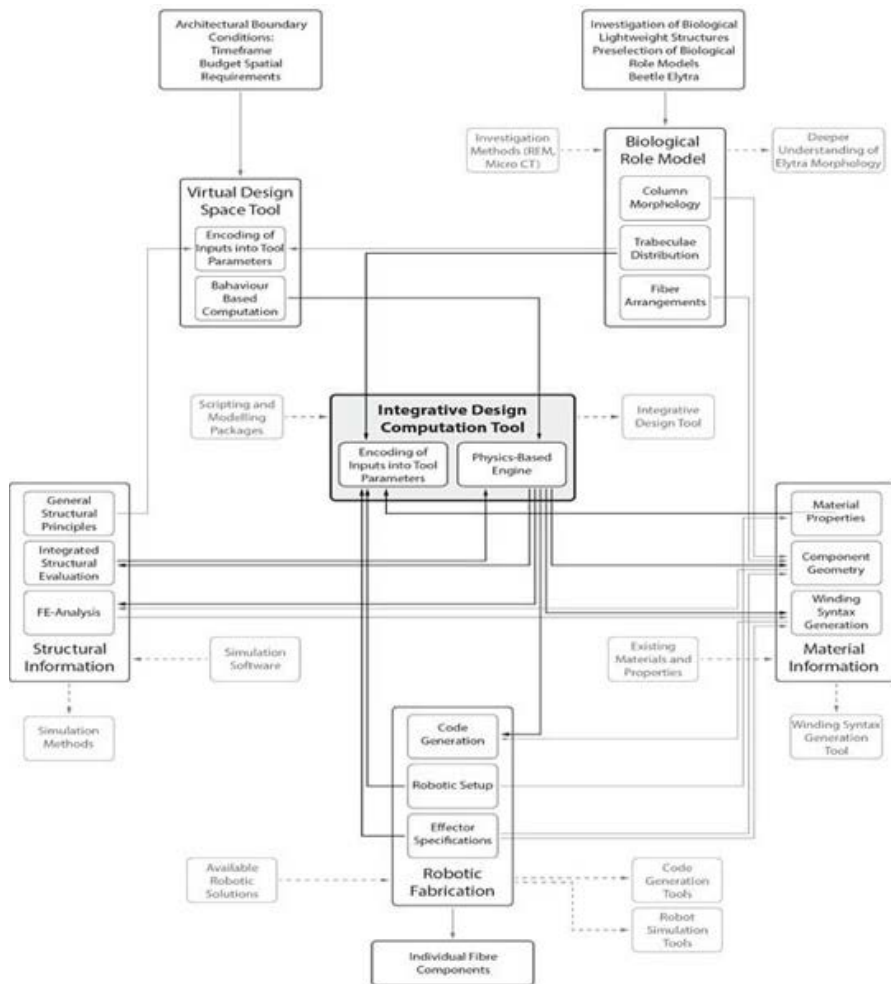
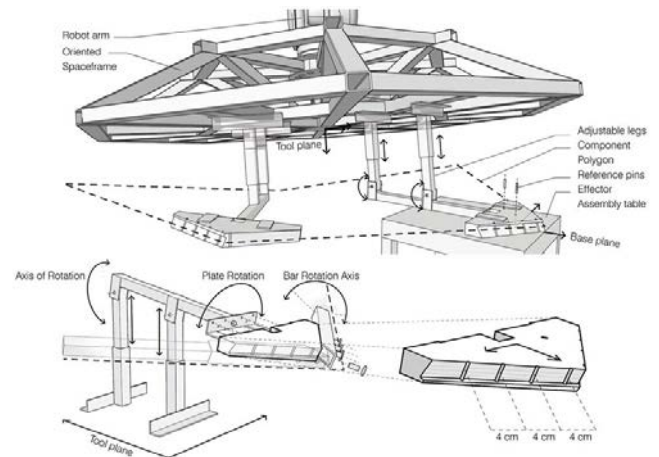
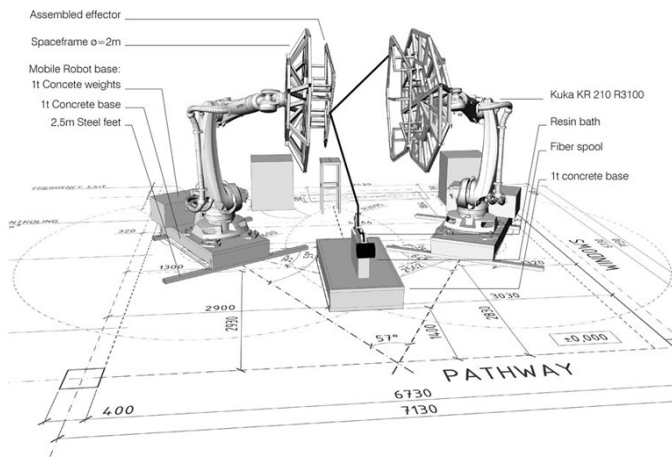


Imagem 105: Estratégia de design e fabricação integrados do ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14. Fonte: ICD.

o módulo adquire a rigidez para manter a sua forma espacial sem núcleo (PRADO et al., 2017). Para cada componente essa distribuição da fibra é específica, gerando uma otimização do sistema e do material (Imagem 104). Vemos aplicada a esse projeto, uma abordagem integrada de baixo para cima (*bottom-up*), onde o seu processo de design absorve informações vindas da natureza, do material, da estrutura e da fabricação, que influenciam reciprocamente em cada etapa subsequente do processo, definindo um possível espaço de soluções e revelando o potencial do design (Imagem 105). Como consequência, uma abordagem de design como essa precisa ser desenvolvida simultaneamente aos métodos de fabricação robótica direcionados a estruturas compósitas de fibras reforçadas (PARASCHO et al, 2014).

A técnica de formação de estruturas utilizando polímeros reforçados com fibra não é nova, mas vem sendo empregada na indústria de forma convencional na fabricação de tanques e reservatório, ou reforço de junções entre peças. Seu processo de produção geralmente inclui um eixo onde o molde gira em velocidade controlada, e sobre um trilho longitudinal, uma máquina CNC de 2 eixos libera a fibra após ser banhada em resina, em um padrão cruzado ou paralelo. A disposição dos carretéis de fibra, e organização das mechas que chegam até a máquina podem conter até mesmo 60 fios simultâneos. Um processo simples automatizado que tem sua configuração limitada a determina-



das soluções. O que a pesquisa desenvolvida pelo ICD se propõe é explorar todo o potencial de desempenho do material, através da relação entre a alta resistência e leveza associadas à sua plasticidade irrestrita atingida pela fabricação automatizada diferenciada. O processo de fabricação robótica por enrolamento elimina a necessidade de fôrmas, dispendiosas e formalmente limitadas, ampliando o leque formal de componentes individualizados em fibra de vidro e carbono (ICD).

Imagem 106: *Set-up* de fabricação com dois robôs sincrônicos, ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14. Fonte: ICD.

Imagem 107: Diagrama dos *end-effectors* ajustáveis para determinação da posição dos vértices de cada componente. Fonte: ICD.

No projeto da instalação Elytra, grande parte do esforço da pesquisa foi depositado no refinamento do **processo de fabricação**, uma vez que a geometria foi simplificada em relação aos experimentos anteriores. No pavilhão de 2013-2014, a configuração de trabalho para fabricação demandou o uso de dois robôs sincrônicos (Imagem 106). Os módulos diferenciados e não planares em dupla camada demandaram um complexo processo de fabricação. Cada robô possuía um *end effector* em quadro metálico para suportar a estrutura do módulo, assim, o fio poderia ser tramado livremente entre os braços, sem nenhuma estrutura de suporte impedindo seu trajeto. O *end effector*, composto por um quadro metálico pré-fabricado, suporta a estrutura do componente em uma angulação, em relação ao plano da ferramenta, determinada por hastes ajustáveis no quadro (Imagem 107). Além disso, reforços triangulares que definem os ângulos internos da estrutura, também controlam o ângulo de rotação das barras da estrutura, direcionando os pinos de controle (parafusos) para enrolamento do fio. Esse processo de angulação da estrutura requer grande controle de calibragem do modelo físico, e consome muito tempo de produção. O dispensador da fibra embebida em resina se encontra estático no centro da configuração, e os robôs se movimentam em sincronia no espaço. A estrutura dupla é movimentada, levando seus pontos de controle até o fio¹⁴⁵. Aqui é preciso mencionar a diferença entre sistemas complexos e sistemas complicados. A complexidade é emergente de uma reciprocidade de critérios materiais, estruturais, ferramentais, e outros mais que sejam adequados a cada situação, enquanto a complicação é imposta a partir de si mesma, ao tentar emular a complexidade.

145 Ver <https://vimeo.com/74714214>



Imagem 108: *Set-up* de fabricação do Elytra Filament Pavilion. Fonte: ICD.

Imagem 109: Detalhe dos pontos de controle do módulo e o dispensador de fio como *end-effector* do robô. Fonte: V&A.



A verdadeira complexidade nasce da simplicidade. O objetivo do autor, desde o início da sua construção de pensamento sobre a abordagem do design através do computacional considera a natureza complexa e descomplicada do design (MENGES, 2010). Em tal cenário, o grupo se viu diante da necessidade de retroceder e descomplicar o que não era necessário, caminhar de volta a uma complexidade descomplicada.

O processo de fabricação desenvolvido em 2016 para o pavilhão Elytra deu um salto em simplificação e refinamento trazendo qualidade e eficiência para sua produção. Esse refinamento foi necessário para viabilizar sua aplicabilidade a uma estrutura arquitetônica maior, e a sua ousadia estrutural que conta com grandes vãos em balanço. A configuração de trabalho foi revista e passou a empregar apenas um robô (Imagem 108). Um suporte inclinável acoplado ao chão tem seu giro automatizado para orientar a estrutura para fabricação. Os quadros metálicos de suporte das estruturas são presos a ele, que orienta os pontos de controle no espaço de alcance do braço. O braço agora é o dispensador de fio, que vai até o ponto de controle, evitando grandes deslocamentos do quadro (Imagem 109). O processo de enrolamento (Imagem 110) começa pela fibra de vidro que preenche a primeira face presa à estrutura de base (*base winding frame*). O acoplamento da estrutura do topo (*top winding frame*) permite o enrolamento da armação lateral do módulo segundo um padrão helicoidal. Em seguida são aplicadas as camadas de fibra de carbono estruturalmente diferenciadas de acordo com a demanda de cada módulo, reforçando o corpo do módulo e seu contorno superior e inferior. Para realizar a face superior, a estrutura de topo é removida e suportes laterais (*brackets*) adicionados para manter a integridade da forma ainda não curada. Alguns componentes contam com 6 pontos de controle para preenchimento da superfície de suas faces, que quando removidos do quadro de suporte, ficam enrijecidos em sua face apenas pela fibra (Imagem 104). Esse processo leva entre 4 a 9h de trabalho, e cada módulo precisa passar por um processo de cura, de 6h à 80°C, antes de ser removido do quadro de fabricação reutilizável¹⁴⁶. No processo de enrolamen-

146

Ver <https://vimeo.com/263863510> e <https://vimeo.com/168351499>.

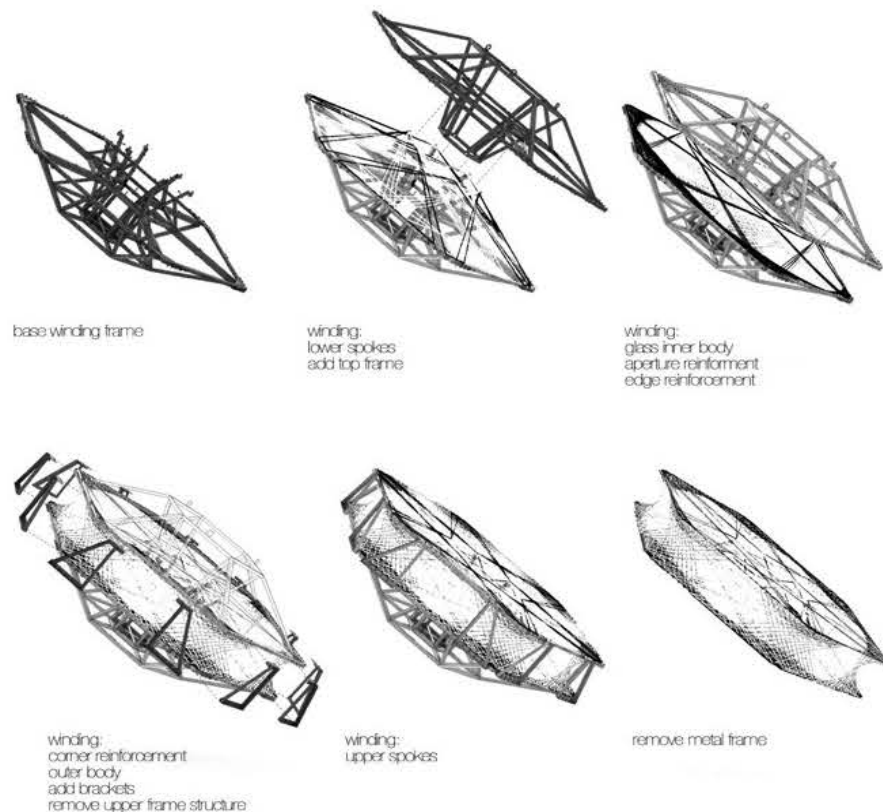


Imagem 110: Diagrama da sequência de enrolamento das fibras. Fonte: PRADO et al., 2017.

to da fibra, a distribuição e espaçamento dos pontos de controle têm influencia direta na forma e resolução da trama. Esses mesmos pontos são usados para conectar os módulos, e sua fabricação, com reforços de vértices embutidos ao processo, tornam desnecessários cortes e furações para o acoplamento de conectores mecânicos, e assim, não comprometendo a integridade do sistema (PRADO et al., 2017).

Os componentes diversos que integram a estrutura e seus sistemas construtivos precisaram ser especialmente desenvolvidos, por se tratar de um desenvolvimento de técnica aplicada à arquitetura, não existem padrões a serem seguidos ou componentes prontos aplicáveis. Todo o detalhamento precisou ser desenvolvido e fabricado. No entanto, não há informações detalhadas desses componentes e conectores usados entre os módulos em si, entre os módulos e os pilares, e entre os módulos e as placas de policarbonato de cobertura.

Finalizada a fabricação, os módulos foram então levados ao museu e montados utilizando uma pequena grua e plataformas elevatórias¹⁴⁷. Com a instalação da unidade de fabricação robótica *in situ*, 3 componentes foram fabricados e adicionados à cobertura (Imagem 111). Esses módulos, além de absorverem informações ambientais que informam seu padrão de fibras, foram otimizados em relação à boa resposta estrutural do sistema construído, que também teve suas tensões monitoradas através de sensores de fibra ótica acoplados à trama¹⁴⁸ (Imagem 112). O resultado, como ressalta o próprio grupo, é semelhante em simbolismo às estufas vitorianas de ferro e vidro

147 Ver <https://vimeo.com/168333615>.

148 Ver <https://vimeo.com/181182894>.



Imagem 111: Robô em performance de fabricação durante a exposição. Fonte: ICD.

da Primeira Revolução Industrial, um pavilhão biomimético sensível, produzido através de processos computadorizados que vem para quebrar paradigmas em um sistema ciber-físico da 4ª Revolução Industrial (ICD).

Os pavilhões anuais desenvolvidos no campus da universidade serviram como suporte a explorações inovadoras e, ao mesmo tempo, são modelos demonstrativos dos avanços científicos alcançados (ver Anexo 4). Por seu experimentalismo, são desconectados de exigências construtivas e de interface com seus sistemas complementares e por isso gozam de grande liberdade. O **ICD/ITKE Research Pavilion 2012**¹⁴⁹ foi o primeiro demonstrador desses novos processos desenvolvidos pelo laboratório, inspirado formalmente e estruturalmente no exoesqueleto das lagostas. Foi nele que a sintaxe de enrolamento do fio foi criada seguindo 3 princípios que permearam todos os outros pavilhões subsequentes: a heterogeneidade da trama que visa minimizar o uso do material enquanto maximiza seu desempenho estrutural; alcançado também através da hierarquia entre filamentos, que desempenham funções específicas dentro da trama; e a funcionalidade integrada ao sistema através de fibra ótica que ilumina e monitora o sistema. Sua configuração de fabricação ainda era muito limitada, pois tratando-se de uma peça única, sua dimensão global fica limitada ao alcance do robô. Em sua configuração de fabricação, o pavilhão rotaciona sobre uma estrutura giratória e o robô enrola o filamento, alcançando do topo à base do pavilhão.

O pavilhão seguinte **ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14**¹⁵⁰, foi discutido aqui paralelamente ao Elytra Filament Pavilion, por se tratar do modelo de desenvolvimento do conceito estrutural em dupla camada sem núcleo, inspirado na carapaça dos besouros. Foi a partir desse grande potencial estrutural que esse modelo foi escolhido para

149 Ver <https://vimeo.com/204005301>.

150 Ver <https://vimeo.com/98783849>.

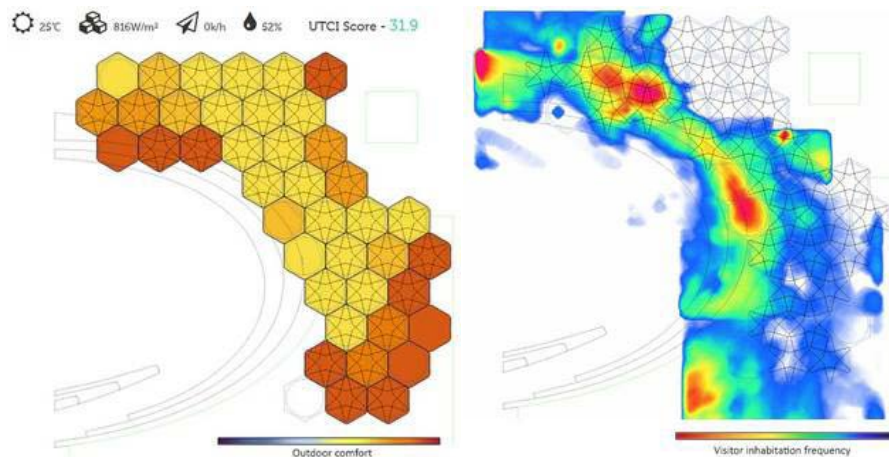


Imagem 112: Mapeamento das condições de conforto térmico e movimento dos visitantes. Fonte: V&A.

maiores ousadias de vãos, passando por um processo de refinamento e simplificação de sua complexidade. O pavilhão seguinte, o **ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15**¹⁵¹, é o de maior poesia na tradução do mundo natural ao domínio computacional. Inspirado nas aranhas-d'água, que criam bolhas de ar dentro de gotas d'água e a vão inflando para formar o molde de seu ninho. Elas então entram dentro da bolha inflada e começam a tramar a estrutura de sua teia. Neste pavilhão, o robô foi encapsulado em uma membrana pneumática em meio ao campus universitário e foi posto a tramar a estrutura de filamento. Os maiores desafios foram mecânicos e seu controle computacional, no processo de viabilizar essa trama em uma superfície lisa, sem ponto de ancoragem para o enrolamento do fio. Foi preciso desenvolver um mecanismo de controle da pressão no fio, com monitoramento em tempo real, além de um dispensador de cola em spray automatizado acoplado ao bico do robô, tudo isso funcionando dentro do espaço ciber-físico de fabricação. Por se tratar de um processo de fabricação performático, visível ao público, foi desenvolvido também um sistema encapsulado de bobinas pré-impregnadas com resina, evitando a sujeira que a resina faz no piso ao sair da banheira no processo anterior. Nesta configuração o robô suporta menos material, em bobinas menores que demandam climatização para a resina não endurecer, exigindo substituições constantes do material. Esse mesmo dispositivo foi usado nos eventos de fabricação do Elytra Filament Pavilion.

O pavilhão seguinte, à experiência com o Elytra, foi o **ICD/ITKE Research Pavilion 2016-17**¹⁵², inspirado em conceitos e comportamentos da natureza, como a força de tensão da teia de aranha capaz de dobrar folhas e a própria trama de seu casulo. Este pavilhão representa um significativo avanço em relação à exploração das capacidades estruturais e de leveza do material, com uma estrutura em balanço de 12m com apenas dois pontos de apoio. Para tanto, foi preciso extrapolar as limitações de espaço de fabricação do robô através da inserção de um novo agente, o drone. O maior desafio foi realizar a integração de agentes de fabricação através de um sistema de comunicação entre

151 Ver <https://vimeo.com/132910518>.

152 Ver <https://vimeo.com/212074407>.

máquinas, e interfaces mecânicas para a transferência de material de uma máquina a outra. Também foi preciso aprimorar seu sistema de controle de tensão e monitoramento em tempo real, já que o drone precisa de mobilidade, através de um fio mais solto, e o robô necessita de tensionamento para enrolar o fio entre os pinos.

Essas constantes explorações e alargamentos da eficiência estrutural e leveza do material conduziram a pesquisa a um novo experimento a ser aberto ao público em 2019, o **BUGA Fiber Pavilion 2019**, na mesma mostra em que irão construir o BUGA Wood Pavilion 2019. A experiência advinda dos constantes testes físicos, aliados ao aprimoramento das simulações computacionais, prometem uma experiência espacial única através dessa nova expressão arquitetônica que o laboratório vem divulgando (ICD).

Podemos ver que a estrutura do processo de trabalho se manteve ao longo de todos esses experimentos, em um esquema de baixo para cima, mesmo que as informações de entrada variassem de um para o outro. E claro, os testes subsequentes entre meio digital e meio físico trouxeram aprimoramentos incorporados dentro do processo de design assim como o de fabricação, aumentando a complexidade de comunicação entre os sistemas integrados dentro do espaço ciber-físico. Vemos em todos eles a inspiração em formas e relações da natureza na busca por uma otimização natural, biológica, ao invés de racional e maquinica. Além disso, a exploração das qualidades do material leva a diversas abordagens e configurações materiais, desenvolvendo uma nova linguagem arquitetônica. O grupo afirma (PRADO et al., 2017, p. 230) que há quase um século não se vê inovação substancial em sistemas construtivos na arquitetura, e que agora talvez seja o momento do carbono em suas estruturas compósitas que abarcam a complexidade das formas computacionais.

Outra questão que se torna visível é a dupla relação da performance do design desenvolvido pelo ICD. Se a performance como desempenho material e estrutural é uma das premissas do design desde o início do processo, a performance como espetáculo também se encontra presente, não só na demonstração do pensamento por trás do produto, mas na sua própria fabricação em espaços públicos. A maneira como os projetos são apresentados, através de vídeos que mostram todo o desenvolvimento do processo, com gráficos ricamente detalhados mostrando o fluxo de informações, demonstra a preocupação do grupo de não apenas em divulgar um produto arquitetônico inovador, mas uma nova maneira de pensar a arquitetura.

3.4.3 Um contraponto: Hooke Park – AA School

Após analisar o pensamento e a produção dos dois maiores grupos de pesquisa em design computacional e fabricação robótica responsáveis pelo direcionamento deste campo disciplinar, voltamos nosso olhar a uma outra abordagem, um contraponto que nos ajudará a entender a adaptação desse movimento à cor local. O Hooke Park não é um laboratório, mas um campus rural da Architectural Association School de Londres. Nele está sediado o programa de mestrado Design + Make, responsável pelo projeto que iremos apresentar. Localizado em Dorset, sudoeste da Inglaterra, o terreno serve de canteiro para pesquisas construtivas há mais de 30 anos. A floresta que abriga o campus é o local e a biblioteca material para os seus projetos. Pertencente inicialmente à Parnham School of Woodland Industries, durante a década de 80 serviu de base para experimentos conduzidos por Frei Otto, como a Prototype House (1987) e o Workshop (1989), ambos em madeira roliça, o primeiro trabalhando a tensão e o segundo a compressão da estrutura. Edifícios que fazem parte da infraestrutura do campus até hoje, e que influenciaram suas construções seguintes, definindo a agenda das pesquisas conduzidas ali. Adquirido pela AA School em 2002, serviu de base para a produção de seus pavilhões de verão entre 2005 e 2009, conduzidos por Charles Walker e Martin Self, os AA Summer Pavilions exibidos na praça em frente à sua sede em Londres. Da constatação da incoerência entre usar madeira laminada importada para a produção dessas geometrias complexas, quando a mesma cresce em sua floresta e compõe a estrutura de sua oficina, surgiu a aspiração de retornar à filosofia original em usar material local.

Em 2010, um *masterplan* foi elaborado para o campus, com a previsão de 16 novos edifícios, cada um servindo de experimentação para o programa do mestrado, onde os estudantes desenvolvem o projeto, detalham e o constroem. A agenda do programa é promover a materialização da arquitetura através da integração entre tecnologias avançadas, técnicas artesanais e uma profunda compreensão do material natural (Hooke Park). Nele, as novas tecnologias de fabricação e design digital são associadas a técnicas tradicionais para a reinvenção de processos onde designer, criador e artefato são reconectados. Sob direção de Martin Self, graduado em engenharia aeroespacial e teoria da arquitetura, com profundo interesse na integração entre as duas disciplinas, fica claro que a busca do conhecimento é feita através do fazer. Self trabalhou no escritório Arup entre 1996 e 2007, realizando análise estrutural e performance aerodinâmica de torres e pontes, e posteriormente com arquitetos de renome como Alvaro Siza, Eduardo Souto de Moura, Shigeru Ban e Zaha Hadid. Em 2010 assumiu a direção do campus Hooke Park e também do programa de mestrado Design + Make em formulação na época (Design + Make).

Em 2015 se juntou à ele Emmanuel Vercruyssen, formado pela Bartlett School of Architecture. Vercruyssen é também diretor do Robotic Fabrication Visiting School e curador do Robotic Development da AA School, e por isso trouxe com ele ao Hooke Park um braço robótico para expandir o campo de experimentação. A sua visão sobre o design digital é de que se trata de um aumento do analógico, em vez de um substituto, e em sua abordagem continua explorando a produção de arquiteturas intuitivamente através de iterações entre desenho, ofício (*craft*), intuição e código. Além da AA School, leciona na Bartlett School of Architecture UCL onde atua também no Protoarchitecture Lab, e colabora com diversos coletivos de arte e arquitetura como o Liquid-Factory, Raven Field Robotics e Sisteem*(makers) (Design + Make).

Os projetos executados no Hooke Park foram mapeados a título de compreensão da sua evolução, mas diferente dos laboratórios apresentados anteriormente, não há diferentes linhas de pesquisa sendo desenvolvidas. O que se vê são diferentes experimentos desenvolvidos em contextos e arranjos diferentes de pesquisadores e tempo. Essa produção pode ser vista no **Anexo 5**, onde dos 14 projetos desenvolvidos no campus, apenas 1 utiliza fabricação robótica (outro encontra-se em andamento). Em relação à produção teórica, o grupo não possui livros publicados, apenas artigos ou capítulos em livros, o que demonstra a importância dada ao fazer prático, e não à elucubrações teóricas.

Wood Chip Barn, Dorset, Inglaterra, 2016

Estrutura em forquilhas brutas de árvore

O celeiro para armazenar serragem de madeira, Wood Chip Barn, foi o primeiro projeto do campus a utilizar fabricação robótica. Foi construído em sequência ao Boiler House (2015) para armazenar a serragem que alimenta o sistema de aquecimento do campus. Em seguida, o abrigo para serra Sawmill Shelter (2017) foi construído junto ao celeiro para completar o ciclo de produção, estocagem e consumo do biocombustível. Projetos que iremos tratar mais a frente para entender as diferentes abordagens do grupo em relação à madeira.

O celeiro possui uma capacidade 400m³ de estocagem graças à sua estrutura em treliça espacial feita viga-Vierendeel, que cobre um vão de 25m. A estrutura espacial toma partido da forma inerente dos 20 troncos de árvore em forquilha utilizados. Seus componentes diferenciados foram arranjados em um arco estrutural com a ajuda de ferramenta de design evolucionário e suas junções fabricadas utilizando um braço robótico, integrando ao projeto de alta tecnologia a matéria bruta encontrada no terreno (Imagem 113).

Como vimos nos projetos anteriores, a madeira está passando por um processo de revalorização como matéria para a arquitetura,



por suas muitas qualidades ecológicas, podendo ser explorada de novas maneiras através das tecnologias digitais. No entanto, as formas orgânicas e complexas perseguidas por esses sistemas não se devem às propriedades geométricas naturais e à estrutura anisotrópica da madeira. Pelo contrário, essas estruturas empregam a madeira em produtos processados e padronizados, que simplificam o material a fim de garantir um controle de suas propriedades (SELF e VERCRUYSSSE, 2017, p. 32). Explorar a capacidade de resistência a momentos dos galhos em sua forma original tornou-se a premissa deste projeto. As forquilhas do tronco apresentam uma estrutura microscópica única, evoluídos pela natureza para alcançar o máximo de resistência com o mínimo de material. Apesar dos nós da madeira serem evitados na produção de seus sub-produtos industrializados, nem sempre a abordagem foi essa. Self (2017, p. 150) nos lembra do conhecimento tradicional dos construtores de barco que adentravam as florestas em busca de árvores com troncos propícios para originar junções estruturais específicas para suas embarcações (Imagem 114). Neste projeto vemos a retomada desse conhecimento tácito aliado à análise e design computadorizados, tornando possível a exploração da estrutura intrincada das bifurcações das árvores.

Os estudantes do programa de mestrado deram início ao **processo de design** pela busca de árvores bifurcadas na floresta do campus. A documentação fotográfica gerou representações bidimensionais dessas forquilhas que foram avaliadas através de algoritmo em busca das melhores configurações para os parâmetros almejados. Das 204 árvores documentadas, 40 se adequaram e 25 foram abatidas e escaneadas detalhadamente em 3D (Imagem 115). No projeto ante-

Imagem 113: Treliça espacial que suporta a cobertura do celeiro. Fonte: Hooke Park.

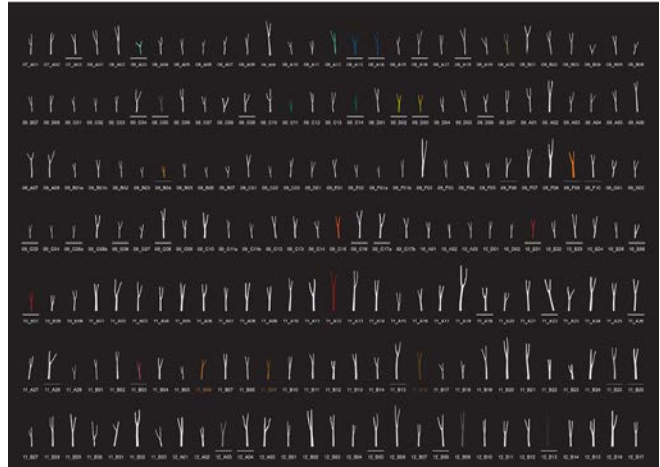
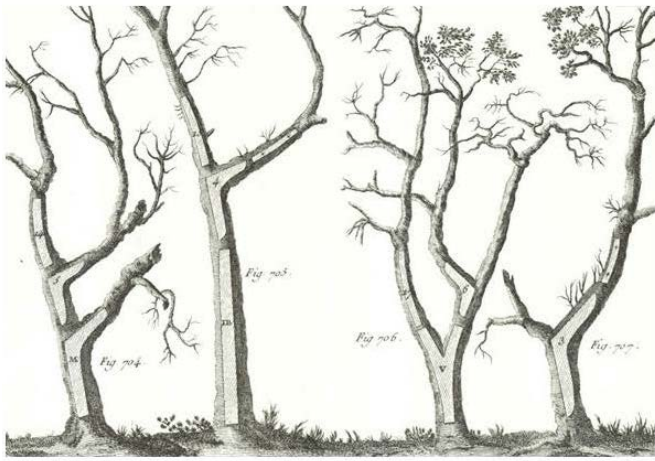


Imagem 114: Ilustração da Encyclopédie Méthodique (1782) de peças de madeira para embarcações em diferentes ramificações das árvores. Fonte: MOLLICA e SELF, 2016.

Imagem 115: 40 forquilhas selecionadas através de análise por script de seu perfil 2D, 25 árvores (coloridas) derrubadas e escaneadas em 3D. Fonte: Hooke Park.

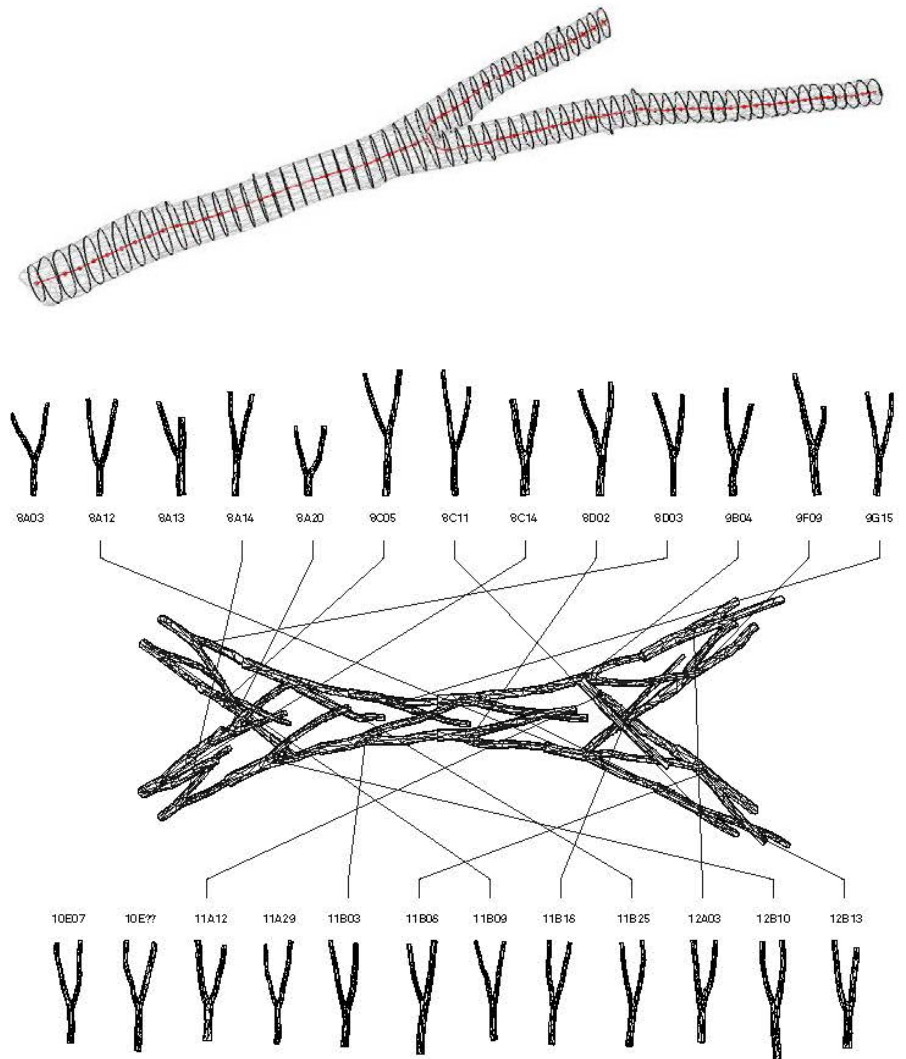
rior Boiler House (2015), foi utilizado um Kinect para Xbox, no entanto, para a integração do processo de fabricação robotizado foi preciso atingir um nível de precisão muito mais elevado através da tecnologia LiDAR. Isso permite uma calibragem entre ambiente digital e material fundamental para o processo de fabricação e montagem. A superfície em *mesh*¹⁵³ gerada no escaneamento deu origem a seções transversais baseadas na variação de diâmetro. Esses círculos geraram as curvas mediais das geometrias, a partir de seus centroides, e delimitaram sua geometria externa (Imagem 116). Ao longo da linha foram estabelecidos pontos que serviram para orientar a geometria ao longo de todo o processo.

A geometria global inicial, uma catenária invertida própria para as forças de compressão dimensionada para o vão, foi definida com a equipe de engenharia do Arup. Nesse momento, também foi levada em consideração a geometria própria dos troncos escaneados. Foi definida a triangulação equilátera da treliça, com arestas de 90cm, atendendo às demandas estruturais e conformações geométricas dos troncos bifurcados. A seção central da treliça é triangular, que é formada por dois arcos inclinados, que se bifurcam em cada extremidade para formar os quatro apoios.

Com esse dado geométrico foi desenvolvido um algoritmo evolutivo e de recozimento simulado¹⁵⁴ (*simulated-annealing*), para buscar o posicionamento ótimo de cada componente bifurcado dentro da treliça, segundo demandas estruturais e de fabricação de suas junções (Imagem 117). Os critérios para essa busca determinavam a aplicação de elementos mais robustos onde as forças axiais eram maiores, a melhor adequação às restrições geométricas e a minimização do desvio das curvas medianas das curvas alvo da estrutura. Começando por

153 Mesh é um método de representação de geometrias complexas baseado em polígonos ou poliedros. A malha criada se aproxima do domínio geométrico através de um arranjo de vértices, arestas e faces. (DUNN, 2012, p. 186)

154 Recozimento simulado é uma técnica de otimização global não determinista vinda da mecânica estatística. Aplica um algoritmo de otimização das propriedades de sistemas complexos em uma busca local probabilística ao substituir a solução inicial por uma solução próxima no espaço de soluções. https://pt.wikipedia.org/wiki/Simulated_annealing



um intercâmbio global de componentes entre locais possíveis na estrutura, a otimização foi refinada com a variação da posição dos elementos através do deslizamento pelas curvas do arco, determinando o seu melhor posicionamento. Nesse momento, a indexação do conjunto de componentes é fundamental para que o sequenciamento de posicionamento pudesse preencher primeiro as posições mais críticas. Os troncos das árvores já possuem uma qualidade que as ferramentas digitais buscam, uma série não padronizada. O que o projeto evolucionário tornou possível aqui foi a sua distribuição seguindo parâmetros formais-estruturais (MOLLICA e SELF, 2016). Esta abordagem estabelece uma relação simbiótica com a variabilidade encontrada na natureza, abarcando seu estado bruto com um grau mínimo de manipulação material. Esta postura é singular diante dos grupos estudados aqui. A complexidade do design é buscada através da manipulação da complexidade material, sem a sua simplificação industrial.

As diversas iterações obtidas ao longo desse processo foram avaliadas pelos engenheiros, e ao se definir a geometria, outro algoritmo foi elaborado para gerar o modelo a ser fabricado, com todas as informações geométricas necessárias (Imagem 118). Para as junções, a estratégia adotada foi de usar a transferência de cargas entre os ele-

Imagem 116: *Mesh* do tronco que deu origem a círculos transversais e a curva medial da geometria através de seus centroides. Fonte: MOLLICA e SELF, 2016.
Imagem 117: *Script* de otimização da distribuição e encontro entre as forquilhas de madeira. Fonte: MOLLICA e SELF, 2016.

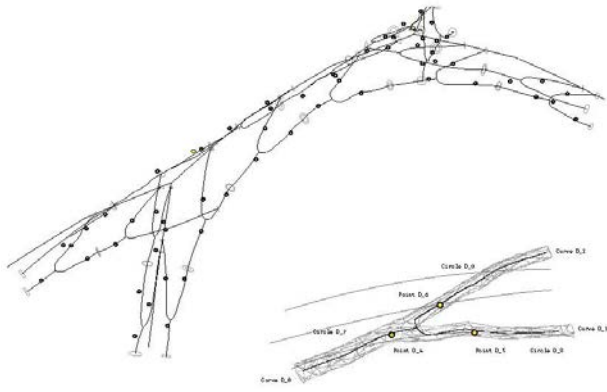


Imagem 118: Modelo final extraído do script de otimização com todos os referenciais para fabricação. Fonte: MOLLICA e SELF, 2016.

Imagem 119: Fabricação das junções entre as peças. Fonte: Hooke Park.

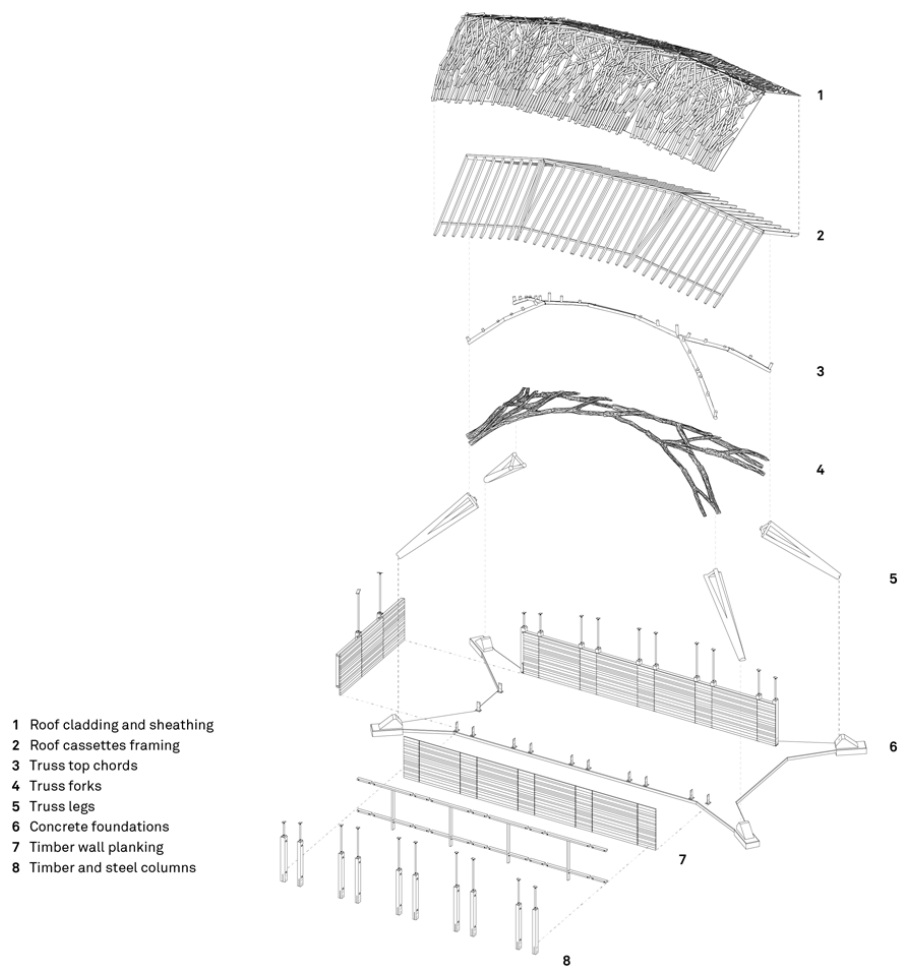
Imagem 120: Montagem indoor da primeira metade da treliça. Fonte: Design + Make.

Imagem 121: Montagem da estrutura no local. Fonte: Design + Make.

mentos por compressão, complementando com parafusos e anéis de aço onde houvesse forças de tensão e de cisalhamento. A geometria dos encaixes variaram entre encontros de topo, com face encontrando face, a juntas tipo macho e fêmea em ângulo ao longo do tronco. Estes encontros foram usinados pelo braço robótico usando os pontos de referenciamento marcados nos troncos no momento em que foram escaneados. São esses pontos de referência que permitem a correta localização no espaço entre o ambiente de modelagem virtual, na célula de usinagem e na montagem final da estrutura.

No **processo de fabricação**, por questões de variação de cerca de 10mm entre as peças físicas e o modelo digital, adotou-se uma estratégia para contornar possíveis problemas de encaixe. Foi definido um volume em cone elíptico para subtração que extrapola a superfície externa do tronco, aceitando que o braço faria operações no ar, ao invés de gerar falhas não-usinadas que precisariam ser contornadas (Imagem 119). Uma futura integração de sensores para escaneamento em tempo real permitirá que o processo de produção seja otimizado, levando informações da realidade física para o digital para a geração do caminho da ferramenta (*toolpath*), integrando o real ao virtual (SELF, 2017, p. 152). As ferramentas utilizadas como *end effectors* foram a motosserra para cortes primários e a fresa para modelagem da junção, demonstrando como uma ferramenta não exata como a motosserra ganha outro nível de precisão aumentado pelo controle computacional (SELF e VERCRUYSSSE, 2017, p. 34).

Após a fabricação dos 20 elementos que compõem a treliça



espacial, foi feita uma pré-montagem em duas partes, que seriam posteriormente unidas in loco. Foi utilizado um gabarito de montagem com as alturas necessárias para posicionamento e fixação de cada elemento (Imagem 120). A precisão da fabricação robótica mostrou-se bem-sucedida e apenas intervenções manuais casuais foram necessárias para realizar ajustes nos encaixes. Posteriormente, as duas partes foram içadas com grua e conectadas aos quatro apoios em forma de tripé invertido já instalados nas fundações (Imagem 121). A estrutura curva da treliça foi complementada com pontaletes para suportar a trama do telhado, com 8.5m em seu ponto mais alto, e posteriormente receber o revestimento também em madeira. Seu fechamento lateral é independente da cobertura, e também é feito em madeira, delimitando a área de 10x25m do celeiro¹⁵⁵ (Imagens 122 e 123). Seu tempo de produção foi de 6 meses, utilizando softwares de baixo custo (Rhinceros e Grasshopper) e recursos locais provando a viabilidade de um fluxo de trabalho de fabricação de design no qual as formas geométricas inerentes podem ser exploradas e implantadas (MOLLICA e SELF, 2016).

Imagem 122: Isometria explodida. Fonte: Dezeen.

O edifício valida a abordagem perseguida pelas experimentações desenvolvidas no campus, de trabalhar as propriedades do material em sua forma bruta, e agora contam com um braço robótico

155 Ver <https://vimeo.com/157159413>.



Imagem 123: Woodchip Barn finalizado.
Fonte: Dezeen.

para viabilizar certos procedimentos de fabricação. Essa abordagem usa as ferramentas de design computacional para trabalhar e explorar a geometria e a estrutura intrínseca do material. Se assemelha em alguns aspectos com a abordagem do ICD, mas leva ao seu extremo ao empregar a madeira bruta cultivada e colhida ali mesmo, trabalhando o material em todo seu processo. A própria questão do cultivo da madeira faz parte do processo, onde ele é entendido como um material vivo com demandas de tempo e energia específicos. Para a equipe do Hooke Park, o manejo da floresta torna-se um processo de design em que se pode guiar a estrutura de suas árvores ao longo de seu crescimento, assim como os marceneiros de barco uma vez o fizeram.

Apesar do arco da geometria do celeiro ser pré-determinado pela estabilidade estrutural e ter havido uma interação entre ela e a geometria dos troncos para antecipação de sua adequação, e não sua determinação, a solução foi encontrada através de uma otimização iterativa de sua disposição. Neste caso, essa disposição dos elementos é limitada à geometria inicial, e um desenvolvimento futuro desse método caminha para extrapolar essa limitação, em um processo de auto-organização. Em um sistema onde os diversos componentes atuem como agentes, através de objetivos espaciais e estruturais e não delimitações, a própria forma estrutural subjacente se auto-organizará (SELF e VERCRUYSSSE, 2017, p. 34).

Para novas estratégias que permitam experimentos estruturais mais complexos o ferramental é essencial. Para isso será adicionado à estrutura de trabalho um sétimo eixo através de um torno horizontal giratório para que o robô tenha acesso a qualquer ponto na extensão do tronco. Essa liberdade para esculpir a madeira abre novas possibilidades formais, estruturais e estéticas, permitindo novos tipos de conexões mais precisas. Além disso, os diversos tipos de sensoriamento robótico enriquecem o processo ao permitir que diferentes informações físicas informem o modelo virtual. Self (2017, p. 152) aponta como possibilidades futuras o mapeamento do grão da madeira para ajustar o design ou o sensoriamento de pressão para controlar

a configuração de usinagem.

Nos edifícios de Frei Otto e Ahrends Burton Koralek da década de 80, **Prototype House (1987)** e **Workshop (1989)**, a madeira roliça foi naturalmente curvada através de sua capacidade elástica de se adaptar à forma estrutural requerida, possível por se tratar de troncos verdes, relativamente finos, retirados de uma floresta nova. Com o passar dos anos, as árvores locais se desenvolveram e precisaram ser trabalhadas de outra forma (ver Anexo 5). O **Big Shed (2012)** foi o primeiro edifício construído dentro do programa de mestrado, e funciona como abrigo para as construções em andamento e para a unidade de fabricação robótica. Sua estrutura em treliças irregulares utiliza largos troncos brutos de madeira roliça, e para tal, foi preciso desenvolver uma engenharia de conexões com parafusos de alta capacidade.

Para o **Timber Seasoning Shelter¹⁵⁶ (2014)** foi empregada outra técnica construtiva, mais comumente usada em design de mobiliário, a curvatura de elementos de madeira utilizando vapor d'água. Esta técnica mantém a integridade das fibras já que não há subtração, e faz uso do vapor quente para deformar plasticamente os elementos, aplicando a eles uma nova forma. A madeira utilizada, longas pranchas com veios longitudinais, foram deformadas e unidas duas a duas para formar uma estrutura recíproca nas três direções. Nesse projeto não houve a preocupação de criar uma superfície de telhado como parte da estrutura, apenas uma lona recobre a forma atendendo às demandas de proteção para o galpão de secagem das madeiras a serem usadas em futuros projetos.

A **Boiler House (2015)** tem grande importância nessa cronologia de projetos e técnicas, pois foi a primeira vez que o grupo aplicou a deformação intrínseca ao crescimento e formação dos troncos para compor a forma, ao invés de impor deformações ao material. Através do mapeamento das árvores da floresta e suas deformações específicas foi projetada uma superfície curva que se adapta à topografia do terreno. A técnica construtiva é a mesma das cabanas de madeira em toras do passado (*log cabins*), troncos empilhados formando a superfície das paredes, que com o uso das tecnologias de design pode incorporar a deformação dos troncos em sua composição formal.

O **Sawmill Shelter¹⁵⁷ (2017)** foi feito posteriormente ao Wood Chip Barn, mas não fez uso do robô em seu processo construtivo. Nele, outra investigação foi conduzida a partir de troncos brutos, mas agora, empregando a deformação por vapor d'água para atingir a forma desejada. Para isso, outra técnica tradicional foi empregada em conjunto para obter a deformação da madeira, o *kerfing*, que consiste no fatiamento do tronco em tábuas longitudinais na extremidade a ser dobrada. Assim, os troncos empregados como pilares saem do chão e tem suas fibras contínuas realinhadas, através do processo combina-

156 Ver <https://vimeo.com/218598060>.

157 Ver <https://vimeo.com/219150352>.

do de deformação, para dobrar e suportar a superfície tensionada da cobertura. Formada por uma rede de ripas de apenas 38x38mm que recobre um vão de 11m, essa superfície recíproca trabalha ao máximo o tensionamento das fibras da madeira, chegando a 2 toneladas de carga em cada ripa. Para evitar imperfeições da madeira que pudessem prejudicar o sistema, foram usadas ripas curtas com junções coladas tipo dedos chanfrados (*finger-jointed scarfed splice*), que apresentaram alto desempenho. O projeto seguinte, ainda em construção, volta a empregar o braço robótico. O **Wakeford Hall (2018)**, que abrigará a biblioteca do campus, explora a estrutura de madeira laminada com junções roboticamente fabricadas com o uso de uma serra de fita como *end effector*.

A abordagem material do Hooke Park agrega grande contribuição à implementação de novas técnicas de design e fabricação ao incorporar conhecimentos tradicionais para trabalhar suas características intrínsecas. Sua matéria prima é basicamente a madeira bruta encontrada no terreno, um recurso local, integrado ao projeto do campus, com seu manejo e uso em pequena escala de produção. No entanto, a técnica desenvolvida de trabalhar o projeto a partir das formas inerentes do material, se aplica a outros contextos e materiais, não apenas à madeira, como também a componentes de construção industrial reciclados, por exemplo. Em uma época em que os arquitetos buscam adicionar tanto sofisticação geométrica às formas construídas como também reduzir a energia incorporada de seus projetos, um novo campo de possibilidades se abre com as tecnologias de projeto e fabricação (SELF e VERCRUYSSSE, 2017). Além disso, o grupo defende a pequena escala de produção, por se tratar de um material disponível em todo planeta, seu processamento próximo ao local de produção e construção é ideal para implementar modelos de processos de fabricação distribuídos.

Ao empregar o conhecimento tácito do material, os saberes tradicionais do ofício (*craft*) com a madeira e a precisão das novas tecnologias de design e produção, o grupo fecha um ciclo integrado que faz emergir a consciência do material em sua forma mais pura e orgânica. Ao seguir em outra direção que não a de automação de processos diferenciados e da produção em larga escala, a associação entre tecnologia e ofício tradicional faz emergir uma relação delicada, empregada no “aumento estratégico de uma lógica natural e complexa” (SELF e VERCRUYSSSE, 2017). Aqui fazemos uso das palavras de Bob Sheil para entender essa retomada da relação com o ofício artesanal (*craft*):

“It may be digitally made and digitally drawn, but it involves a great degree of craft, and one of the ideas (...) is that craft is not something solely associated with making things by hand, craft is the knowledge. Craft is an idea that extends across media, across materiality.” (SHEIL, 2010)¹⁵⁸

3.5 A produção nos trópicos, ou uma ausência

“(...) Meu trabalho é cheio de nó pelas costas. Tenho de transfazer natureza. À força de nudez o ser inventa. Água recolhendo-se de um peixe. Ou, quando estrelas relvam nos brejos. No meu serviço eu cuido de tudo quanto é mais desnecessário nessa fazenda. Cada ovo de formiga que alimenta a ferrugem dos pregos eu tenho de recolher com cuidado. Arrumo paredes esverdeadas pros caramujos foderem. Separo os lagartos com indícios de água dos lagartos com indícios de pedra. Cuido das larvas tortas. Tenho de ter em conta o limo e o ermo. Dou comida pra porco. Desencalho harpa dos brejos. Barro meu terreiro. Sou objeto de roseiras. Cuido dos súcubos e dos narcisos. E quando cessa o rumor das violetas desabro. Derrubo folhas de tarde. E de noite empedreço. Amo desse trabalho. Todos os seres daqui têm fundo eterno.” (BARROS, 1985, p. 46)

Ao desviarmos o olhar do umbigo do mundo em direção a outras partes menos “desenvolvidas” constatamos que é preciso abrir caminhos, iniciar novas rotas por uma produção robotizada de arquiteturas de cor local. Caminhando em direção aos trópicos, encontramos em diversas áreas repetições e importações, mas também desvios que seguem outras linhas condutoras do pensamento, disrup-turas que podem levar ao inefável.

A noção geográfica de trópico se refere aos paralelos que delimitam as zonas limiars de projeção zenital dos raios do Sol sobre a superfície terrestre, os solstícios. A etimologia da palavra trópico, *tropikos* no grego, *tropicus* no latim, se refere à volta, virada, volta em torno de, mudança. Para além dos trópicos, em direção aos círculos polares, não há um dia sequer do ano que um objeto vertical deixe de produzir sombra. Na região tropical, no entanto, sempre existirá, um dia do ano que seja, um momento em que esse mesmo objeto não terá sombra, quando a luz é completamente desimpedida.

Tratando-se de uma tecnologia cara desenvolvida na Europa, seu espraiamento não foi capaz de cruzar os trópicos, se limitando aos Estados Unidos e países da Europa e Ásia na porção norte, e à Austrália e Chile na porção sul. Em um mapeamento realizado pela Association for Robots in Architecture (Imagem 124), fica visível essa escassez, como se houvesse ali, nas linhas dos trópicos, uma resistência que essa tecnologia não foi capaz de superar. Mas irá, muito em breve.

Cabe agora imaginarmos possibilidades para a tropicalização dos braços robóticos na arquitetura, mergulhar na cultura, na vida, no

158 “Pode ser feito digitalmente e digitalmente desenhado, mas envolve um grande grau de ofício artesanal, e uma das ideias (...) é que o artesanato não é algo exclusivamente associado a fazer coisas à mão, o artesanato é o conhecimento. Artesanato é uma ideia que se estende através da mídia, através da materialidade.” Tradução da autora.



Imagem 123: Woodchip Barn finalizado.
Fonte: Dezeen.

cotidiano em que serão inseridos em um futuro próximo, para deixar brotar respostas dessa multiplicidade intercultural, de um “povo novo, em fazimento” (RIBEIRO, 2006). Assumindo que a tecnologia não é neutra e reflete as motivações e aspirações de quem a produz, quais são as reflexões necessárias nesse início de debate sobre uma arquitetura fabricada por robôs dentro da realidade brasileira? Trata-se muito mais de um convite à contemplação, do que a apresentação de respostas, uma abertura de debate. Talvez encontremos um paralelismo com outros momentos da história em que também nos deparamos com a necessidade de uma antropofagia para nos compreender e reencontrar nossa identidade diante de movimentos que primeiro desabrocham no velho mundo e vêm aportar em terras tupiniquins.

A mera importação de tecnologia europeia aplicada aos trópicos pode ser comparada à nossa exploração lunar, sob o ponto de vista da artista Joanna Griffin. Para ela, entender os fenômenos lunares sob parâmetros terrestres é perder a essência do desconhecido, enquanto a investigação espacial requer desprendimento e imaginação para viver o inexperenciado. Se formos carregados de velhos padrões iremos apenas replicar hábitos conhecidos da Terra em um outro mundo, perdendo a oportunidade do intangível. Além disso, as missões lunares não só são meios de transporte para ideologias e padrões terrestres serem projetados na Lua, mas “apenas algumas ideologias são permitidas dentro das espaçonaves” (GRIFFIN, 2014, p. 54). Essas projeções que chegam à Lua constroem o que se permitiu ser pensado sobre a Lua, balizadas por seus primeiros pensadores. Ao importarmos o pensamento computacional desenvolvido na Europa para os Trópicos precisamos ter claros seus limites, enxergando que em todo processo de tradução, tentamos domesticar o desconhecido escrevendo o observador no objeto observado. Mas quem é o observador? E quem somos nós brasileiros? Segundo Darcy Ribeiro,

“Somos povos novos ainda na luta para nos fazermos a nós mesmos como um gênero humano novo que nunca existiu antes. Tarefa mui-

to mais difícil e penosa, mas também muito mais bela e desafiante. (...) Estamos nos construindo na luta para florescer amanhã como uma nova civilização, mestiça e tropical, orgulhosa de si mesma. Mais alegre, porque mais sofrida. Melhor, porque incorpora em si mais humanidades. Mais generosa, porque aberta à convivência com todas as raças e todas as culturas e porque assentada na mais bela e luminosa província da Terra.” (RIBEIRO, 2006, p. 411)

No entanto, não é só a velhos vícios de importação que precisamos estar atentos e fortes, mas às amarras de mentalidades estreitas que só conseguem enxergar a tecnologia por seu viés produtivo, pelos números que alcança, ou pelas formas que apresenta. Afinal, já caímos nessa emboscada antes, como Lina Bo Bardi nos lembra em 1979, “O entusiasmo pela arquitetura, isto é, pela prática científica que informou toda a arquitetura contemporânea transformou-se em tecnocracia, em teoria dos modelos.” Uma produção de laboratório, ou de uma indústria, corre o risco de se desligar da realidade mesma, de se tornar uma falsa tecnologia, uma tecnocracia, com objetivos muito pequenos vendidos como grandes. As mudanças de paradigmas de produção atuais correm o mesmo risco se forem conduzidas ao extremismo racional, levando à perda das capacidades poéticas da arquitetura, sua natureza dinâmica e aberta (COLLETTI, 2013. P. 12).

Se este novo movimento tecnológico catalisou novas abordagens de design e produção na arquitetura, ele simultaneamente segregou, já que a grande maioria dos arquitetos não tem esse grau de conhecimento tecnológico, nem mesmo acesso a tal infraestrutura. Na verdade, desconhecemos a própria linguagem das máquinas, somos incapazes de nos comunicarmos com elas em níveis profundos. Trata-se de uma tecnologia difícil de controlar que demanda conhecimentos em robótica e programação, além de um ambiente multidisciplinar (BONWETSCH, 2015). A menos que a programação se torne mais acessível e presente desde a formação inicial dos arquitetos, e que essa tecnologia se barateie, o design computacional e a fabricação robótica continuarão restritos a uma minoria privilegiada e especializada. Precisamos estar cientes que o analfabetismo do futuro é o da linguagem de programação, e que por isso, deve entrar na pauta da educação desde agora (LEMOS, 2013). Se não, corremos o risco de agravar esse cenário onde somos cada vez mais dependentes de códigos “desenhados” por uma minoria de homens brancos¹⁵⁹. Se desconhecemos, como iremos opinar? Como nos tornar críticos sem

159 Até mesmo o movimento *Maker*, que incentiva o faça-você-mesmo (DIY) e as tecnologias de fonte aberta (*open source*) possui essa parcialidade e desequilíbrio interno. A ex-pesquisadora do MIT Media Lab, Leah Buechley, levanta a questão “quem são os *makers*?” e vai em busca da resposta investigando a revista americana MAKE, importante veículo de divulgação dessa cultura. Ao longo de seus 9 anos de existência até aquele momento, os *makers* de suas 39 capas consistiam em 85% homens branco ou asiáticos, 15% mulheres, e 0% de negros e minorias. Porcentagem semelhante foi constatada também em seu editorial e em seus artigos publicados. <https://vimeo.com/110616469>.

entender suas lógicas?

Estamos diante de uma página em branco, a primeira de um livro inteiro a ser preenchido com a história do uso que se fará das novas ferramentas de design e fabricação computacional no Brasil. Podemos aproveitar esse início, a nossa introdução, para deixarmos claros nossos objetivos e aspirações, a partir de uma consciência crítica de como essas mesmas ferramentas foram primeiro utilizadas, e do poder que carregam. É só a partir do entendimento profundo desses novos processos em desenvolvimento na Europa que poderemos entender seus porquês e para onde levam seus caminhos traçados. A partir daqui, dos trópicos, é preciso lançar um outro olhar sobre os fatos, se não quisermos ser ecos de vozes alheias. Trata-se de um mundo novo a ser descoberto e se historicamente não soubemos o que fazer com esse mundo novo, é porque não descobrimos uma forma de pensar por nós mesmos (SANTOS, 2001).

Para dar início a essa busca experimental, o LAMO, juntamente com outros laboratórios de pesquisa não só da Faculdade de Arquitetura, mas também da Belas Artes e da Engenharia de Sistemas e Computação, estão propondo o CAFE - Centro Avançado de Fabricação e Experimentação Digital¹⁶⁰ aqui mesmo na UFRJ. Vimos que o conhecimento integrado é fundamental para desenvolver pesquisas avançadas e de alta complexidade, e se faz necessário criar as estruturas de suporte para tal integração. O projeto inicial para o CAFE conta com uma unidade robótica de médio porte e 3 unidades de pequeno porte, bem como a reforma de adequação do espaço físico do laboratório. Tal investimento seria capaz de lançar o LAMO a um patamar acima nos processos investigativos de design computacional e fabricação robótica, permitindo uma expressão latino-americana na produção de conhecimento no campo da arte, arquitetura e engenharia. No entanto, o projeto segue aguardando uma melhor conjuntura política e financeira para acontecer.

Vemos esse nosso “atraso” tecnológico como uma vantagem, na verdade, pois ganhamos tempo para pensar. No momento certo, poderemos desenhar o nosso próprio processo diferenciado ao abarcar essas ferramentas de design, e acreditamos que diferentemente do que se tem visto por lá, não será pelo viés da matéria. Aqui, a matéria é abundante, transborda e se putrefaz aos montes, ao mesmo tempo em que é escassa e precisa ser constantemente reinventada. Aqui, não somos feitos de razão, nosso corpo é de carnaval. Somos feitos de caos¹⁶¹, mas este não é aleatório, errático, uma vez que se percebe a

160 O CAFE atenderá não só os laboratórios de pesquisa idealizadores, que são: LAMO-PROURB, LAURD-PROURB, NANO-PPGAV; LABVIS-PPGAV e LAM-PESC-COPPE, como também outros laboratórios da universidade que já são parceiros do LAMO, unindo diversas áreas do conhecimento.

161 As bases da teoria do caos foram traçadas pelo matemático francês Henri Poincaré no final do século XIX ao descobrir o que ficou conhecido mais tarde como efeito borboleta. As equações matemáticas possuem uma dependência extremamente sensível às condições iniciais, e pequenas variações em valores iniciais acarretam em grandes discrepâncias futu-

ordem subjacente de sua natureza. Somos parte de um sistema complexo com sua coerência interna feita de muitos padrões intrincados. De racionalismo o mundo está cheio, precisamos é de mais mágica. E mágica se produz através de coisas inúteis, de coisas sem sentido para o senso comum. Como um paradoxo lógico¹⁶² que se contradiz e descompõe aquele que o tenta entender através da razão. Podemos fazer uso dessa mesma linguagem racional para desconstruí-la, ao revelar suas limitações lógicas. E diante de tal perplexidade só nos resta a poesia, pois “há muitas maneiras sérias de não dizer nada, mas só a poesia é verdadeira.” (BARROS, 1996)¹⁶³.

“A poesia está guardada nas palavras — é tudo que eu sei.
Meu fado é o de não saber quase tudo.
Sobre o nada eu tenho profundidades.
Não tenho conexões com a realidade.
Poderoso para mim não é aquele que descobre ouro.
Para mim poderoso é aquele que descobre as insignificâncias (do mundo e as nossas).
Por essa pequena sentença me elogiaram de imbecil.
Fiquei emocionado.
Sou fraco para elogios.” (BARROS, 2001)

Não ousamos aqui apontar o caminho para uma pesquisa que ainda não existe. Intencionamos apenas alimentar o debate, adubar a terra e estimular que pensemos esse futuro coletivamente. O que queremos que viceje nesta terra do sol?

ras. Poincaré supôs que tal observação não se restringia à matemática, mas trata-se de um fenômeno ubíquo. <https://plus.maths.org/content/maths-minute-beginnings-chaos>. A teoria do caos desperta muitas questões filosóficas, e com os avanços da computação, as investigações sobre complexidade e o caos começaram a se desenvolver (anos 70-80). Por sua sensibilidade a valores que não podemos informar com precisão, o caos é imprevisível, mesmo que regido por leis simples e conhecidas, e por isso seus resultados são complexos e surpreendentes. <https://plus.maths.org/content/chaos-order>.

162 A lógica matemática nos apresenta diversos paradoxos, como a famosa frase “Esta afirmação é falsa”, que data desde a Grécia antiga. Ao seguir a linha de pensamento da afirmação chegamos à conclusão que se ela for falsa, é verdadeira, e se for verdadeira é falsa, nos levando a uma contradição. A tradição Zen nos apresenta paradoxos mais significativos, como quando pergunta “O que é isto?”. A técnica, chamada de koan, faz uso da linguagem para acessar espaços inacessíveis à razão. A esta pergunta não há resposta, mas somente a pergunta, pois sua especulação não pode ser racional, mas incorporada. Aquele que é questionado se torna a questão. O paradoxo da pergunta sem resposta nos permite lançar um olhar crítico sobre como se vê e como se organiza o mundo a partir desse ponto de vista, pois o pensamento lógico nem sempre leva à compreensão. Há a sensação de abertura, de perplexidade, de falta de chão, de libertar-se do conhecido. <https://tricycle.org/magazine/what/>.

163 Manoel de Barros, poeta pantaneiro que subverte a sintaxe criando muitos neologismos e sinestias. Sua obra é considerada de vanguarda primitiva associada à Poesia Pau-Brasil. https://pt.wikipedia.org/wiki/Manoel_de_Barros.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

“Technology is the answer, but what was the question?” (PRICE, 1979)¹⁶⁴

Vimos ao longo do trabalho como se desenrolou a relação entre arquitetura e tecnologia digital, como o conceito de computação mudou ao longo do tempo, e agora temos seu potencial retomado pelas novas tecnologias de fabricação robotizada. Da execução de tarefas exaustivas para explorações de formas complexas, chegamos ao momento da computação de processos. O design passou da manipulação de composições formais à geração de formas através de diferentes novos processos. O pensamento sistêmico trouxe essa mudança de perspectiva, do objeto para as relações e padrões de comportamento. No campo da produção dessas arquiteturas, extrapolamos as limitações do padronizado em direção ao diferenciado e agora invertemos a ordem de comando dentro do processo. De abordagens de cima para baixo (*top-down*) podemos agora informar o design através de regras e comportamentos que ocorrem localmente, que então definem o resultado final, globalmente, em uma abordagem de baixo para cima (*bottom-up*). A capacidade de manipular dados complexos permite a integração entre forma, material e tectônica em processos que não mais se encontram divididos, design, simulação e fabricação agora se interseccionam no espaço ciber-físico abrindo as portas para uma nova cultura material.

Os sistemas do passado se complexificaram, abarcam agora dados precisos desde a estrutura molecular do material à forma global e suas capacidades estruturais, sem mencionar suas aplicações em escala urbana. Através da computação podemos acessar camadas mais profundas de padrões qualitativos de sistemas complexos, trazendo à tona a ordem subjacente de seu caos aparente. A hierarquia linear ora vista entre design, análise e fabricação dá lugar a um modelo integrado de produção suportado por sistemas de *feedback* em tempo real. Essa integração profunda de parâmetros de design e de fabricação se tornou possível pela incorporação de sistemas robóticos de fabricação, iniciada há 13 anos atrás. Vivemos uma nova fase na qual, assim como no início do design digital onde não havia precedentes, nos encontramos sem referenciais para o desenvolvimento de um novo contexto na história da arquitetura computacional, e mais do que nunca, cheio de possibilidades.

¹⁶⁴ Tecnologia é a resposta, mas qual era a pergunta?”. Tradução da autora.

A pesquisa se torna nesse momento fundamental para a prática arquitetônica, desenvolvida não apenas dentro de universidades e seus centros de pesquisa avançada, mas dentro dos próprios estúdios de arquitetura com seus especialistas responsáveis por essa integração, os chamados “grupos especializados de modelagem”¹⁶⁵ (*specialist modeling groups*). Os primeiros estúdios com capacidade de fabricação robótica de arquitetura já começam a surgir, e estabelecem trocas contínuas com a academia em eventos como o Fabricate¹⁶⁶ e o Rob I Arch¹⁶⁷. Sua produção infelizmente não coube no recorte da dissertação. Nosso objetivo aqui foi apresentar o estado da arte dessa nova produção justamente pelos responsáveis em reformular a disciplina, seus pesquisadores mais influentes que gozam de liberdade experimental, e que também reverberam em outras universidades do mundo no processo de formação dos arquitetos do futuro.

Nos deteremos a fazer alguns cruzamentos percebidos ao longo dessa análise dos estudos de caso. Talvez as diferenças fundamentais entre os dois laboratórios estudados estejam em seu objetivo último. Percebemos que o primeiro grupo, o Gramazio Kohler Research, deposita seus esforços aos problemas da construção com enfoque na industrialização de métodos computacionais, levando a pesquisa para a prática, para a construção de arquitetura de fato. Já o ICD, se empenha em resolver problemas de design através de novas maneiras de pensar o design, está na exploração de novas abordagens que buscam respostas nas estruturas da natureza através do design morfogenético. Sua abordagem se desenrola muito mais como exploração investigativa, através de processos de *form-finding*, do que resposta assertiva. Para Menges, a consolidação de uma nova cultura material fica a cargo das gerações futuras (2015a p. 15). Isso leva a abordagens materiais completamente diferentes, e talvez por isso não haja um consenso entre eles a respeito de sua definição. Se Gramazio e Kohler cunham o termo ‘materialidade digital’ em 2008, Menges busca uma ‘nova cultura material’, por se tratarem mesmo de duas abordagens distintas que levam a materialidades distintas. Vemos em seus textos nítida diferença no vocabulário empregado. Enquanto o primeiro usa constantemente o termo robô, no segundo ele quase não aparece, mas utiliza sempre termos equivalentes que associam à sua capacidade de computação.

O grupo suíço direciona sua pesquisa a processos industriais racionalizados, em busca da automação de processos diferenciados. Suas técnicas partem de premissas produtivas existentes, em direção à uma releitura, ou seu aprimoramento. O assentamento de tijolos figurou entre as tarefas designadas aos robôs durante a década de 90, e agora pode ser considerada bem sucedida com os diversos avanços

165 Ver KESTELIER, Xavier de. *Recent Developments at Foster + Partners’ Specialist Modelling Group*. In: PETERS, Brady; KESTELIER, Xavier de (eds.). *Computation Works: The building of algorithmic thought*. Architectural Design, Profile n 222. Londres: John Wiley & Sons, 2013.

166 Ver <http://www.fabricate.org/>.

167 Ver <http://www.robarch2018.org/>.

alcançados pelo grupo de pesquisa. O mesmo ocorre com a sua produção em madeira que vai em busca da complexidade para a pré-fabricação e montagem de treliças de madeira. Sua investigação é direcionada aos processos de montagem através da computação e do robô. Ao aprimorar uma técnica construtiva existente, o grupo desenvolve plataformas integrativas para processos cada vez mais complexos que têm como objetivo sua produção racionalizada.

Já o grupo alemão busca um novo pensamento de design através do computacional, inserindo não só a natureza no design, mas produzindo um novo conhecimento sobre o material e o ofício. Suas técnicas produtivas exploradas não são consagradas, mas precisam ser criadas, e por isso o design ganha grande importância no processo. O design definirá sua viabilidade. Estruturas em casca geralmente possuem uma superfície contínua, ou uma estrutura em malha contínua, mas vimos o emprego de placas segmentadas pelo grupo. Sua exploração demandou análise minuciosa de suas junções, bem como de suas formas globais e locais para que o design fosse estruturalmente possível. O mesmo acontece no caso da estrutura filamentar utilizada sem fôrma e sem núcleo de enrolamento. Um desafio construtivo se torna um problema de design a ser perseguido, pois sua experimentação busca validar uma nova técnica construtiva.

Enquanto o primeiro se preocupa em resolver problemas construtivos, o segundo se empenha em problemas de design. Já o contraponto inglês é muito menos pretensioso, lida com as questões daqui, de seu próprio quintal, com a certeza que as respostas globais se encontram justamente nessa abordagem local. E para isso resgata o conhecimento humano tradicional sobre o ofício ao lidar com o mundo material, aumentando-o através do computacional.

Talvez esses objetos de estudo, os projetos realizados sejam ainda muito “ensimesmados”, onde seu sentido se volta inteiramente a si mesmo e ao que representam, como vitrine que são de um futuro próximo. Por serem demonstradores de novos métodos, a arquitetura em si fica obscurecida. O objeto visual ofusca a experiência, rouba a cena por ser diferente de tudo que já foi visto antes, ficamos mesmo embotados. Talvez somente quando esse encanto passar, pela materialidade do objeto a arquitetura computacional poderá se revelar.

No desenrolar da história entre arquitetura e tecnologias digitais vimos em sua primeira fase o encanto pelas formas, possíveis apenas através do design digital. A manipulação de geometrias através de novos processos formativos sejam eles topológicos, paramétricos ou animados, ocuparam grande parte do discurso da arquitetura digital até o início do século XXI. A partir da integração digital entre design e fabricação, o encantamento recai sobre as máquinas de fabricação. Os arquitetos digitais ficam deslumbrados com a retomada do poder perdido sobre o fazer, pois agora o que projetam vai diretamente para

a fabricação, sem um processo intermediário de tradução. A nova fase que vivemos, do design computacional, nos revela um terceiro encantamento advindo dessa relação entre arquitetura e tecnologias digitais, o reencanto pela matéria. A possibilidade de integrar a matéria e suas camadas mais profundas ao design computacional desde o início da sua concepção rouba a cena e o discurso dos arquitetos do momento (*mainstream*). Acontece que, todo o discurso da nova materialidade da arquitetura digital é embasado nas ideias de Deleuze, que acredita em um mundo material existente independente da mente humana. Talvez precisemos trazer ao debate o contraponto do idealismo, aprofundado com as novas descobertas da ciência cognitiva e da física quântica, mas precisaríamos de mais tempo para uma discussão filosófica tão profunda.

A visão material do mundo, de um tempo em que o realismo materialista balizava a concepção da ciência, entra em questionamento com as descobertas da física quântica¹⁶⁸, quando fenômenos inexplicáveis pela ciência clássica passam a surgir diante dos olhos dos cientistas. Por exemplo, a sobreposição de estados nos revela que os sistemas físicos existem em todos os estados simultaneamente¹⁶⁹. São partículas e são ondas, ao mesmo tempo, e quando medidos ou observados, os sistemas se mostram em um único estado (BAKER, 2015, p. 32). Enquanto se pensa só a matéria e seus aspectos físicos, os outros estados presentes são omitidos, ou anulados, ou seja, estamos deixando escapar algo. A questão é trazer consciência de tal fato científico para os novos métodos computacionais. Fazer conscientes de que, ao se estabelecer uma maneira de olhar o fenômeno, estamos condicionados a perder todas as outras maneiras de apreendê-lo (OOSTERHUIS et al. 2011, p. 106). Isso por si só traz leveza e liberdade ao processo de criação, desconstrói pretensões irrealistas de se estabelecer 'a' nova verdade. Segundo Peter Testa (2017, p. 297), do laboratório Robot House, da SCI-Arc, este conceito da sobreposição de estados pode nos fornecer um novo modelo de conceitualização da continuidade entre digital e analógico em tempos ciber-físicos. Além disso, tudo indica que no futuro teremos como coautores do processo de design super computadores, os computadores quânticos¹⁷⁰, capazes de processar fenômenos

168 Bernard d'Espagnat, físico e filósofo da ciência, foi um dos primeiros a interpretar os significados filosóficos profundos das experiências no campo da física quântica. Em seu artigo *The Quantum Theory and Reality* (1979) demonstra como as premissas científicas até aquele momento estavam em contradição com os novos experimentos da mecânica quântica, abalando importantes pilares do conhecimento humano. Nele afirma: "A doutrina de que o mundo é composto de objetos cuja existência é independente da consciência humana está em conflito com a mecânica quântica e com os fatos estabelecidos por experimentos.". E conclui: "Uma descoberta que desacredita uma suposição básica sobre a estrutura do mundo, uma suposição há muito mantida e raramente questionada, é tudo menos trivial. É uma iluminação bem vinda.". Tradução da autora.

169 <https://whatis.techtarget.com/definition/superposition>

170 Gigantes como a Google, Microsoft e IBM estão desenvolvendo processadores quânticos que irão mudar significativamente o desenvolvimento de Inteligência Artificial. https://pt.wikipedia.org/wiki/Computador_qu%C3%A2ntico e https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_computing.

como a superposição e o emaranhamento na realização de operações de *big data*. Talvez seja o momento de nos familiarizarmos com tais conceitos.

Sabemos que massa e energia são equivalentes, segundo Einstein¹⁷¹, e se os computadores nos fornece um outro tipo de energia, ultrapoderosa mas no entanto, plana, diferente de nossa complexa rede cerebral hierárquica e multidimensional (BAKER, 2015, p. 204), começamos a perceber pelo desenrolar da história que essa energia, quando não acompanhada de sabedoria e atenção plena tem consequências desastrosas. Um dos desafios que temos pela frente vai além do controle dessa energia elétrica, mas em relação à nossa própria capacidade de (re)aprender a cultivar os recursos da energia humana e direcioná-los a fins positivos.

“So this new tool - among all the horrors to which it is already giving place - may well bear the potential to unlock the door on the universal laws that govern the appearance and destruction of form, and in so doing to free us from the multiple tyranny of determinism and from the poverty of a linear, numerical world. Yet there should be no illusions: the possibilities for such a scenario are almost already foreclosed, and it will certainly not come to pass with anything short of a colossal, sustained and collective act of human will. It is we, the engineers of human environment and activity, who bear the burden to ensure a properly human pleading in this struggle for our fate.” (KWINTER, 2011, p. 214-215)¹⁷²

Segundo Kwinter (2011), teórico e crítico da arquitetura, para tal empreitada dramática precisamos de duas coisas, resistência e produção afirmativa. Ao cruzarmos a linha do mundo mecânico em direção ao computacional, temos à nosso alcance novos níveis de relações intrincadas. Para lidar com elas, precisamos de resistência para redirecionar o pensamento teórico para longe dos clichês de mente estreita e criar novos conceitos adequados à materialidade eletrônica e seu efeito brutal tanto na energia humana como no ambiente físico. A produção afirmativa vem então para pressionar a computação em direção ao seu enraizamento no mundo arcaico da inteligência natural, ou seja, usar a computação de forma mais aberta aos sentidos e à intuição humana, e menos pela lógica de padrões estabelecidos, justamente

171 Teoria da Relatividade Especial publicada em 1905, que contém a famosa fórmula $E = mc^2$. https://pt.wikipedia.org/wiki/Teoria_da_relatividade.

172 “Portanto, esta nova ferramenta - entre todos os horrores aos quais ela já está dando lugar - pode ter o potencial de abrir a porta para as leis universais que governam a aparência e a destruição da forma, e assim nos libertar da múltipla tirania do determinismo e da pobreza de um mundo linear, numérico. No entanto, não deve haver ilusões: as possibilidades para tal cenário já estão quase encerradas, e certamente não acontecerá com nada menos que um ato colossal, ato sustentado e coletivo de vontade humana. Somos nós, os engenheiros do ambiente e da atividade humana, que carregamos o fardo de garantir um apelo humano adequado a essa luta pelo nosso destino.”. Tradução da autora.

porque a computação tem o potencial de nos libertar do determinismo e da linearidade de pensamento. Essa inteligência natural tem potencial de ir além das racionalizações que fazemos dos padrões físicos e estruturais da natureza. Se temos acesso a novas relações através da computação, precisamos de desprendimento e imaginação para viver o inexperenciado. Os dispositivos em si não indicam absolutamente nenhuma direção para a aventura coletiva (LÉVY, 1990), mas sim as relações e subjetividades que usamos para alimentar esses modelos digitais de fenômenos complexos.

Se por muito tempo consideramos objetos inanimados, como a matéria ou as máquinas, como instâncias comportamentais, ou seja, sem intenção porque são desprovidos de mente pensante, podemos agora rever esse conceito. O design baseado em comportamento assume que esse comportamento é estabelecido por regras e parâmetros, que difere de ação, pois esta demanda uma intenção para ser executada. Regras podem definir um comportamento simples e direto, mas ao estabelecer regras abertas e sujeitas a fatores imprevisíveis a intenção começa a emergir no sistema mais visivelmente. Isso requer critérios de design refinados para desenvolver propriedades sutis que podem ser difíceis de definir. É desafiador, e pode-se dizer que quando falamos de programação a afirmação do controverso Wittgenstein se aplica: “os limites da minha língua significam os limites do meu mundo.” (WITTGENSTEIN, 1922, 5.6). Os processos de baixo para cima (*bottom-up*) ainda sim possuem critérios de cima para baixo (*top-down*), onde as relações que emergem e informam o design ainda são controladas por restrições impostas ao espaço e escopo do trabalho. Assim, toda emergência é acompanhada de intencionalidade (OOSTERHUIS et al. 2011, p. 110), e trazer consciência para tal só engrossa o caldo de possibilidades emergentes de relações cada vez mais dinâmicas, interativas e indeterminadas.

A introdução do robô nessa interface natureza-computador-mente humana tem implicações profundas, uma vez que a nossa paisagem mental é transformada. Para Picon (2014, p. 59) o robô leva o designer a pensar em um espaço 3D dinâmico, onde não há mais uma direção privilegiada, nossa concepção de espaço se transforma. Se transforma também nossa concepção filosófica histórica de privilégio à lógica da simplicidade. O complexo e o múltiplo configuram essa nova paisagem relacional sustentada pela tecnologia. E, além disso, o robô leva a integração de concepções antagônicas como o concreto e o abstrato, o físico e o eletrônico (PICON, 2014, p. 59), dando um passo em direção à dissolução de dualidades.

Mesmo que o aparato técnico esteja montado, e estejam sendo postos em uso, uma nova cultura material para além do físico e uma nova concepção do pensamento não se consolidarão em poucos anos. A computação gera um impacto na arquitetura com infinitas possibilidades de desdobramento que iremos assistir nas próximas décadas,

até encontrar a expressão pura de seu tempo, e esta depende inteiramente do enredo que os atores escolhem animar. A questão chave que podemos observar nos sistemas ciber-físicos que compõem nosso tecnocosmo atual é justamente o agenciamento de interfaces, que como Lévy (1990, p. 178) define, é o estabelecimento de contato entre meios heterogêneos, a condução de operações de tradução. É nesse contato que reside o conhecimento, nas articulações, na arquitetura da rede. Sua construção inteligente se faz fundamental, pois “ela permite dissolver as substâncias, as definições instáveis e as pretensas determinações para devolver os seres e as coisas à fluidez do devir. A seu devir social, questão de lutas e de projetos, mas também a seu possível devir estético ou existencial.” (LÉVY, 1990, p.186).

Se as técnicas não determinam nada, mas condicionam tudo, as tecnologias computacionais nos abrem novas condições, mas somos nós, os atores que as determinamos. Para Lévy, em seu livro *As Tecnologias da Inteligência: O futuro do pensamento na era da informática* (1990), essa relação é libertadora, pois não é mais a razão e a eficácia que determinam essa dinâmica, mas uma infinidade de lógicas e de processos interpretativos divergentes. Nesse momento, passa a ser impossível excluir a tecnociência da esfera política. Para o autor, o primeiro passo em direção à uma tecnodemocracia se dá a partir do reconhecimento da técnica em geral como “nem boa, nem má, nem neutra, nem necessária, nem invencível” (p. 196), colocá-la em seu devido lugar.

“Já foi possível compreender que, de certa forma, a tecnopolítica já ocorre nas reinterpretações, desvios, conflitos, alianças e compromissos aos quais se dedicam os operadores do coletivo. Para tornar-se tecnodemocracia, não falta à tecnopolítica nada além de transcorrer também na cena pública, onde os atores são cidadãos iguais, e onde a razão do mais forte nem sempre prevalece. Renunciar à imagem falsa de uma tecnociência autônoma, separada, fatal, todo-poderosa, causa do mal ou instrumento privilegiado do progresso para reconhecer nela uma dimensão particular do devir coletivo, significa compreender melhor a natureza deste coletivo e tornar mais provável o advento de uma tecnodemocracia. Não alimento nenhuma ilusão quanto a um pretense domínio possível do progresso técnico, não se trata tanto de dominar ou de prever com exatidão, mas sim de assumir coletivamente um certo número de escolhas. De tornar-se responsável, todos juntos. O futuro indeterminado que é o nosso neste fim do século XX deve ser enfrentado de olhos abertos.” (LÉVY, 1990, p.198)

Para além de posturas extremas como tecno-utopismo ou tecno-pessimismo, devemos mesmo é encarar sua esfera política porque coletiva, em busca de uma tecnodemocracia, mesmo que democracia se encontre tão esvaziada de sentido. Talvez seja nosso dever reinventá-la, encontrar outro termo para dar nome ao seu significado, para poder começar de novo, coletivamente, colaborativamente. Pode ser que através da tecnologia encontremos uma rota em direção à nossa humanidade, pois o que fizemos até agora, foram apenas ensaios (SANTOS, 2001).

Esta dissertação trata de colocarmos os pés no presente, para nos apossarmos do momento onde estamos, com todo desenvolvimento técnico alcançado e todo conhecimento acumulado em busca de sabedoria. É conhecendo a rota estabelecida pelo pensamento dominante que poderemos propor ajustes, indicar outros caminhos possíveis. “Para inventar a cultura do amanhã, será preciso que nos apropriemos das interfaces digitais. Depois disso, será preciso esquecê-las.” (LÉVY, 1990, p.134). Vamos em busca de uma teoria para então abandoná-la, usando-a como princípio instrumental, não como princípio de verdade¹⁷³. Como aquele que quer chegar à outra margem do rio, e quando chega, deve abandonar o barco para enfim estar lá. Se olharmos para a natureza em busca de sua apreensão estritamente física, material e estrutural, enquadrando-a em sistemas, ainda estaremos presos em uma lógica baseada em padrões, submetendo-a às nossas projeções. Precisamos nos liberar, ir além de metáforas conceituais estabelecidas no campo da ciência, pois se nos enquadrarmos dentro de pensamentos lógicos perdemos o tecido inteiriço da natureza, e talvez possamos descobrir que a natureza que buscamos não é externa ao homem, mas a sua própria natureza primordial pura. Talvez essa seja a natureza que nos forneça o que primordialmente buscamos através do design, algo perdido, que não suspeitamos o que seja, mas para encontrá-lo precisamos ir despídos de cultura humana, adentremos a própria experiência concreta da vida.

173 Dogmas transformam a ciência em uma religião, segundo Paul Feyerabend (1975). E por essa vereda poderíamos investigar suas ideias a respeito do anarquismo científico utilizado como antídoto à epistemologia e à filosofia da ciência. Paul afirma que não deveríamos levar a ciência tão a sério, pois trata-se de uma ideologia, e sua validade depende da sua capacidade instrumental de causar mudanças e nos libertar. E por isso os modelos de verdade são perigosos. Descartes defendeu que o conhecimento, ou a verdade, só poderia ser alcançado através de um método. A filosofia hermenêutica de Hans-Georg Gadamer (1975) demonstra outras formas de se alcançar a verdade como a filosofia, a arte e a história propriamente dita. Para ele o fenômeno de compreender e corretamente interpretar a realidade extrapola a ciência e envolve a própria experiência humana do mundo. Além disso, existem verdades que estão além dos métodos científicos, não são domesticáveis por nossas ferramentas limitadas. Percebemos que algo em comum nessa busca pela verdade, seja pela ciência ou pela arte, é a importância da liberdade, do insight criativo, de uma mente não fixa para o novo surgir.

5. REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, Christopher (1968). Systems generating systems. In: MENGES, A.; AHLQUIST, S. (eds.). **Computational Design Thinking**, Architectural Design Reader, v. 5. Londres: John Wiley & Sons, 2011. P.58-67.
- APOLINARSKA, Aleksandra Anna; BARSTSCI, Ralph; FURRER, Reto; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. Mastering the “Sequential Roof”: Computational Methods for Integrating Design, Structural Analysis, and Robotic Fabrication. In: ADRIAENSSENS, A.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M.; MENGES, A.; PAULY, M. (eds). **Advances in Architectural Geometry 2016**, Zürich: Hochschulverlag an der ETH Zürich, 2016. Disponível em: <http://www.gramaziokohler.com/data/publikationen/1204.pdf>
- APOLINARSKA, Aleksandra Anna; KNAUSS, Michael; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. The Sequential Roof. In: MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, David. **Advancing Wood Architecture: A computational approach**. Londres: Routledge, 2017.
- BAKER, Joanne. **50 ideias de física quântica que você precisa conhecer**. São Paulo: Planeta, 2015.
- BANHAM, Reyner (1960). **Teoria e Projeto na Primeira Era da Máquina**. São Paulo: Editora Perspectiva, 1979.
- BARDI, Lina Bo (1979). Arquitetura e tecnologia. In: RUBINO, S.; GRINOVER, M. (Org.). **Lina por escrito: Textos escolhidos de Lina Bo Bardi**. São Paulo: Cosac Naify, 2009. p. 143.
- BARROS, Manoel de (1985). **Livro de Pré-Coisas**. Rio de Janeiro: Record, 2003.
- BARROS, Manoel de (1996). **Livro sobre nada**. Rio de Janeiro: Alfaguara, 2016.
- BARROS, Manoel de. **Tratado Geral das Grandezas do Ínfimo**. Rio de Janeiro: Record, 2001.
- BAYAZIT, Nigan. **Investigating Design: a review of forty years of design research**. Design Issues, v. 20, n. 1, p. 16-29, winter 2004.
- BAUMAN, Zygmunt (1999). **Modernidade Líquida**. Rio de Janeiro: Zahar, 2001.
- BERTALANFFY, Ludwig von (1968). **Teoria geral dos sistemas**. Petrópolis: Editora Vozes, 1973.
- BECHTHOLD, Martin (2010). The Return of the Future: A Second Go at Robotic Construction. In: OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert (eds.). **The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies**. Londres: John Wiley & Sons, Architectural Design, V. 8, n. 4, 2010, p. 116-121.
- BECHTHOLD, Martin (2014). Design Robotics: A new paradigm in process-based design. OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert (eds.). **Theories of the Digital in Architecture**. Nova Iorque: Routledge, 2014.
- BONWETSCH, Tobias; KOBEL, Daniel; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. The informed Wall: applying additive digital fabrication techniques on architecture. In: **Synthetic Landscapes: 25th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture, ACADIA, 2006**, Louisville. Proceedings. Louisville: University of Kentucky, Lexington, 2006. Disponível em: <http://www.gramaziokohler.com/data/publikationen/499.pdf>
- BONWETSCH, Tobias; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. Digitally Fabricating Non-Standardised Brick Walls. In: **ManuBuild**, 2007, Rotterdam. Conference Proceedings. Rotterdam: D. M. Sharp, 2007. Disponível em: <http://www.gramaziokohler.com/data/publikationen/533.pdf>
- BONWETSCH, Tobias. **Robotically assembled brickwork: Manipulating assembly processes of discrete elements**. 2015. 160f. Tese (Doutorado em Ciência) – ETH Zürich, Zúrique, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010602028>
- BURRY, Jane. Philosophy of Mathematics for Computational Design: Spatial Intuition Versus Logic. In: MENGES, A.; AHLQUIST, S. (eds.). **Computational Design Thinking**, Architectural Design Reader, v. 5, Londres: John Wiley & Sons, 2011.
- CAMPOS, José Carlos G. **Fabricação Robótica em Arquitetura: Princípios, processos e aplicações**. 2016. 139 F. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade do Porto, Porto, 2016. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/87253>

- CARPO, Mario. **The Alphabet and the Algorithm**. Cambridge: The MIT Press, 2011.
- CARPO, Mario (ed.). **The digital turn in architecture: 1992-2012**. Londres: John Wiley & Sons, Architectural Design Reader, 2013.
- CARPO, Mario. The new science of form-searching. In: MENGES, Achim (ed.) **Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational**, Architectural Design, Profile n 237. Londres: John Wiley & Sons, 2015.
- CARPO, Mario. **The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence**. Cambridge: The MIT Press, 2017.
- CELANI, G.; GODOI, G.; RODRIGUES, G. O processo de projeto arquitetônico mediado por computador: um estudo de caso com o Architectural Desktop. In: **Graphica 2007**, 2007, Curitiba. Proceedings Graphica 2007, 2007. Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/~lapac/papers/celani-godoi-rodrigues-2007.pdf>
- CELANI, M. G. C. Glossário. In: MITCHELL, William J. **A Lógica da Arquitetura: Projeto, Computação e Cognição**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.
- CELANI, M. G. C. Uma nova era para a arquitetura. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M. (Orgs.). **Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão**. São Paulo: ProBooks, 2018. P. 17 a 20.
- COLLETTI, Marjan. **Digital Poetics: An Open Theory of Design-Research in Architecture**. Abingdon: Routledge, 2013.
- COUTINHO, Joana de Sousa. **Materiais de Construção 1: Madeiras**. 1999. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~jcouti/Madeiras%2099.pdf>
- DeLANDA, Manuel. **Complexidade Material em Tectônica Digital**. Chichester: Wiley Academy, 2004.
- DeLANDA, Manuel. The New Materiality. In: MENGES, Achim (ed.) **Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational**, Architectural Design, Profile n 237. Londres: John Wiley & Sons, 2015.
- D'ESPAGNAT, Bernard. **The Quantum Theory and Reality**. Scientific American, 1979. Disponível em: https://static.scientificamerican.com/sciam/assets/media/pdf/197911_0158.pdf
- DONALD, Merlin. **Origins of the Modern Mind: Three Stages in the Evolution of Culture and Cognition**. Cambridge: Harvard University Press, 1993.
- DUBBERLY, Hugh; PANGARO, Paul. Cybernetics and Design: Conversations for Action. In: **Cybernetics and Human Knowing**. Vol. 22 (2015), nos. 2-3, pp. 73-82. Disponível em: <https://ccsmfa.files.wordpress.com/2015/12/dubberly-pangaro-chk-journal-2015.pdf>
- DUNN, Nick. **Digital Fabrication in Architecture**. Londres: Laurence King Publishing, 2012.
- ENGEL, Heino (1997). **Sistemas Estruturais**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2001.
- FEYERABEND, Paul. **How to Defend Society Against Science**. Scientific Revolutions, n. 11. 1975. Disponível em: <https://anarcosurrealisti.noblogs.org/files/2010/10/Feyerabend-Paul-How-to-defend-society-against-science.pdf>
- FLUSSER, Vilém(1983). **Filosofia da Caixa Preta: Ensaios para uma futura filosofia da fotografia**. São Paulo: Editora Hucitec, 1985.
- FLUSSER, Vilém(1985). **Into the Universe of Technical Images**. Minneapolis: University of Minnesota Press, 2011.
- FLUSSER, Vilém. **O Mundo Codificado**. São Paulo: Cosac Naify, 2007.
- FRAZER, John (1995a). The Architectural Relevance of Cyberspace. In: CARPO, Mario (ed). **The Digital Turn in Architecture: 1992-2012**, Architectural Design Reader, v. 6. Londres: John Wiley & Sons, 2013, p. 48-52.
- FRAZER, John (1995b). A Natural Model for Architecture. In: MENGES, Achim; AHLQUIST, Sean (Ed.). **Computational Design Thinking**. Nova Jersey: Wiley: AD Reader, 2011. p. 149-157.

- GADAMER, Hans-Georg (1975). **Truth and Method**. Londres: Continuum, 2006.
- GERE, Charlie (2002). **Digital Culture**. Londres: Reaktion Books, 2008.
- GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias (2008a). **Digital Materiality in Architecture**. Zurich: Lars Muller, 2008.
- GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias; BONWETSCH, Tobias (2008b). **Sistemas Robóticos de Albañilería: Tecnología Digital para La Construcción de Muros de Fábrica**. Pasajes Construcción 35, 2008. p. 4-7. Disponible em: <http://www.gramaziokohler.com/data/publikationen/575.pdf>
- GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias (2014a). **The Robotic Touch: How Robots Change Architecture**. Zurich: Park Books, 2014.
- GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias (2014b) (eds.). **Made by Robots: Challenging Architecture at a Large Scale**. Londres: John Wiley & Sons, Architectural Design, No. 229, 2014.
- GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias; WILLMANN, Jan (2014c). Authoring Robotic Processes. In: GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias (eds.). **Made by Robots: Challenging Architecture at a Large Scale. Architectural Design**, Profile n 229. Londres: John Wiley & Sons, 2014.
- GRIFFIN, Joanna. Hitchhiking to the moon. In: LASTRA, Claudia. (Ed.) **Manifesto for a Republic of the Moon**. Londres: The Arts Catalyst, 2014.
- HEISENBERG, Werner (1955). **La Imagen de la Naturaleza en la Física Actual**. Antwan Editor Digital, 2013.
- HENRIKSEN, D; et al. **A Cybernetic Perspective on Design and Creativity: a Conversation with Dr. Paul Pangaro, D. Henriksen & The Deep-Play Research Group** (2017), Tech Trends (61)6, 2017. <http://www.punyamishra.com/wp-content/uploads/2017/10/Pangaro-interview-Tech-Trends-2017.pdf>
- HENRIQUES, Gonçalo C.; PASSARO, Andrés; NÓBREGA, Guto. Tentáculos: Recriando criaturas híbridas, analógico-digitais. In: **Sigradi 2016**. XXI Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital, 2016, Buenos Aires. Blucher Design Proceedings. 2017. Disponible em: https://www.researchgate.net/publication/321232704_Tentaculos_Recriando_criaturas_hibridas_analogico-digitais
- HOUAISS, Antônio (ed.). **Minidicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2010.
- ISO. 8373:2012. **Robots and robotic devices — Vocabulary**. 2012 Disponible em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en>
- KILIAN, Axel (2017a). Foreword. In: MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, David. **Advancing Wood Architecture: A Computational Approach**. Londres: Routledge, 2017, p. xix-xxv.
- KILIAN, Axel (2017b). Architectural Perspectives. In: MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, David. **Advancing Wood Architecture: A Computational Approach**. Londres: Routledge, 2017, p.211-217.
- KNIPPERS, Jan. KOSLOWSKI, Valentin. SOLLY, James. FILDHUTH, Thiemo. Modular Coreless Filament Winding for Lightweight Systems in Architecture. In: **8th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering**, Hong Kong, 2016. Conference Paper, 2016. Disponible em <https://www.researchgate.net/publication/313421984>
- KOLAREVIC, Branko. Designing and Manufacturing Architecture in the Digital Age. In: **Architectural Information Management: 19th eCAADe Conference Proceedings**, 117-123. eCAADe: Conferences. Helsinki, Finland: Helsinki University of Technology, 2001.
- KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing**. Abingdon: Taylor & Francis Group, 2005.
- KOLAREVIC, Branko. Actualising (overlooked) material capacities. In: MENGES, Achim (ed.). **Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational**, Architectural Design, Profile n 237. Londres: John Wiley & Sons, 2015.

KRIEG, Oliver David; SCHWINN, Tobias; MENGES, Achim; LI, Jian-Min; KNIPPERS, Jan; SCHMITT, Annette; SCHWIEG-ER, Volker. Biomimetic Lightweight Timber Plate Shells: Computational Integration of Robotic Fabrication, Architectural Geometry and Structural Design. In: BLOCK, Philippe; KNIPPERS, Jan; MITRA, Niloy J.; WANG, Wenping. **Advances in Architectural Geometry 2014**. Londres: Springer, 2014, p. 109-125. Disponível em: <http://www.springer.com/gp/book/9783319114170>

KWINTER, Sanford (2003). The computational fallacy. In: MENGES, A.; AHLQUIST, S. (eds.). **Computational Design Thinking**, Architectural Design Reader, v. 5. Londres: John Wiley & Sons, 2011, p.211-215.

LATOURE, Bruno (1994). **Jamais fomos modernos**. São Paulo: Editora 34, 2009.

LEE, E. A.; SESHIA, S. A. **Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach**. LeeSeshia.org, 2011. Disponível em: http://leeseshia.org/releases/LeeSeshia_DigitalV1_08.pdf

LEMOS, Ronaldo. **Não saber programar é o analfabetismo do futuro**. Folha de S. Paulo, São Paulo, 14 nov. 2013. Coluna. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/colunas/ronaldolemos/2013/11/1365651-nao-saber-programar-e-o-analfabetismo-do-futuro.shtml>

LÉVY, Pierre (1990). **As Tecnologias da Inteligência: O Futuro do Pensamento na Era da Informática**. São Paulo: Editora 34, 2010.

LYNN, Greg (1993). Folding in Architecture. In: CARPO, Mario (ed). **The Digital Turn in Architecture: 1992-2012**, Architectural Design Reader, v. 6, . Londres: John Wiley & Sons, 2013.

LYNN, Greg (1996). Blobs (or Why Tectonics is Square and Topology is Groovy). In: **ANY: Architecture**, New York, No. 14, Tectonics Unbound, 1996. p. 58-61.

LYNN, Greg (1999). Animate Form. In: OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert. **Theories of the Digital in Architecture**. Nova Iorque: Routledge, 2014.

LYNN, Greg. **Archaeology of the Digital**. Santa Monica: Ram Publications, 2014.

MATARIC, Maja J. **Introdução à Robótica**. São Paulo: Editora Unesp/Blucher, 2014.

MCCULLOUGH, Malcom (2006). Scripting. In: CARPO, Mario (ed.). **The digital turn in architecture: 1992-2012**. Londres: John Wiley & Sons, Architectural Design Reader, 2013.

MCLUHAN, Marshall (1964). **Understanding Media: The Extensions of Man**. Cambridge: The MIT Press, 1994.

MENGES, Achim. **Uncomplicated Complexity. Integration of Material, Form, Structure and Performance in Computational Design**. GAM Magazine, 06 - Nonstandard Structures, 2010. P.140.

MENGES, A.; AHLQUIST, S. (eds.). **Computational Design Thinking**, Architectural Design Reader, v. 5. Londres: John Wiley & Sons, 2011.

MENGES, Achim (2012a) (ed.). **Material Computation: Higher Integration in Morphogenic Design**, Architectural Design, Profile n 216. Londres: John Wiley & Sons, 2012.

MENGES, Achim (2012b). Morphospaces of Robotic Fabrication. In: Brell-Çokcan S., Braumann J. (eds). **Rob | Arch 2012**. Vienna: Springer, 2012. p. 28-61.

MENGES, Achim (2015a) (ed.). **Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational**, Architectural Design, Profile n 237. Londres: John Wiley & Sons, 2015.

MENGES, Achim (2015b). The New Cyber-Physical Making in Architecture Computational Construction. In: MENGES, Achim (ed.) **Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational**, Architectural Design, Profile n 237. Londres: John Wiley & Sons, 2015. P.28-33.

MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, David (2017a) (eds.). **Advancing Wood Architecture: A**

Computational Approach. Londres: Routledge, 2017.

MENGENS, Achim; SHEIL, Bob; GLYNN, Ruairi; SKAVARA, Marilena (eds.) (2017b). **Fabricate 2017: Rethinking Design and Construction.** Londres: UCL Press, 2017. Disponível em: <http://www.ucl.ac.uk/ucl-press/browse-books/fabricate>

MITCHELL, William J. **The Theoretical Foundation of Computer-Aided Architectural Design.** Environment and Planning B, v. 2, p. 127-150, 1975.

MITCHELL, William J. (1990a). A New Agenda for Computer-Aided Architectural Design. In: MENGENS, Achim; AHLQUIST, Sean (eds.). **Computational Design Thinking.** Nova Jersey: Wiley: AD Reader, 2011. p. 86-93.

MITCHELL, William J. (1990b). **A Lógica da Arquitetura: Projeto, Computação e Cognição.** Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

MITTEROECKER, P.; HUTTEGGER, S. M. The Concept of Morphospaces in Evolutionary and Developmental Biology: Mathematics and Metaphors. *Biological Theory* 4, Konrad Lorenz Institute for Evolution and Cognition Research, 2009, p. 54-67.

MOLLICA, Zachary; SELF, Martin. Tree Fork Truss: Geometric Strategies for Exploiting Inherent Material Form. In: ADRIAENSSENS, A.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M.; MENGENS, A.; PAULY, M. (eds). **Advances in Architectural Geometry 2016,** Zürich: Hochschulverlag an der ETH Zürich, 2016. Disponível em: <http://vdf.ch/advances-in-architectural-geometry-2016.html>

NARVÁEZ-RODRIGUEZ, R.; MARTÍN-PASTOR, A.; AGUILAR-ALEJANDRE, M. The Caterpillar Gallery: Quadratic Surface Theorems, Parametric Design and Digital Fabrication. In: BLOCK, Philippe; KNIPPERS, Jan; MITRA, Niloy J.; WANG, Wenping. **Advances in Architectural Geometry 2014.** Londres: Springer, 2014, p. 109-125. Disponível em: <http://www.springer.com/gp/book/9783319114170>

NEGROPONTE, Nicholas (1969). Towards a Humanism Through Machines. In: MENGENS, Achim; AHLQUIST, Sean (Ed.). **Computational Design Thinking.** Nova Jersey: Wiley: AD Reader, 2011. p. 78-85.

NEGROPONTE, N. (ed.). **Reflections on Computer Aids to Design and Architecture.** New York: Petrocelli/Charter, 1975.

OOSTERHUIS, Kas; FENG, Han; XIA, Xin (eds.). **iA#4: Quantum Architecture.** Heijningen: Jap Sam Books, 2011.

OXMAN, Neri (2009). Material Ecology. In: OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert. **Theories of the Digital in Architecture.** Nova Iorque: Routledge, 2014. Disponível em: http://matter.media.mit.edu/assets/pdf/Publications_ME.pdf

OXMAN, Neri. Programming Matter. In: MENGENS, Achim (ed.). **Material Computation: Higher Integration in Morphogenic Design,** Architectural Design, Profile n. 216. Londres: John Wiley & Sons, 2012, p. 88-95.

OXMAN, Rivka. Theory and Design in the First Digital Age. In: **The International Journal of Design Studies,** Elsevier, Vol. 27, No. 3, 2006. P. 229-265 Disponível em: <http://arq510002.paginas.ufsc.br/files/2011/04/Design-Studies-Theory-and-design-in-the-first-digital-age-Rivka-Oxman-1.pdf>

OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert (eds.). **Theories of the Digital in Architecture.** Nova Iorque: Routledge, 2014.

PARASCHO, Stefana; KNIPPERS, Jan; DORSTELMANN, Moritz; PRADO, Marshall; MENGENS, Achim. Modular Fibrous Morphologies: Computational Design, Simulation and Fabrication of Differentiated Fibre Composite Building Components. In: BLOCK, Philippe; KNIPPERS, Jan; MITRA, Niloy J.; WANG, Wenping. **Advances in Architectural Geometry 2014.** Londres: Springer, 2014, p. 109-125. Disponível em: <http://www.springer.com/gp/book/9783319114170>

PARÉ, Zaven. **O Robô e a Maçã.** Rio de Janeiro: 7 Letras, 2010.

PASK, Gordon (1969). The Architectural Relevance of Cybernetics. In: MENGENS, A.; AHLQUIST, S. (eds.). **Computational Design Thinking,** Architectural Design Reader, v. 5. Londres: John Wiley & Sons, 2011. P.68-77.

- PASSARO, Andrés; ROHDE, Clarice. Casa Revista: Um estudo em fabricação digital em busca de transformação social. In: **Fórum Habitar 2014**, 1º, 2014, Belo Horizonte. Anais Habitar 2014. Belo Horizonte: UFMG, 2014.
- PASSARO, Andres; ROHDE, Clarice. **Casa Revista: Arquitetura de Fonte Aberta**. Gestão e Tecnologia de Projetos: São Carlos, v.11, n.2, p.25 – 41, jul-set 2016. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/114437>
- PASSARO, Andrés; ROHDE, Clarice; VIANNA, M. Elisa R.; ESTRADA, Rebeca D. LAGO, Laura; SANT'ANNA, Julia. **Abrigos Sensíveis**. 2018
- PICON, Antoine. Architecture and the Virtual: Towards a New Materiality. In: REESER, A; SCHAFER, A. (eds.). **New Technologies/New Architectures**, Praxis 6. Boston: Hogrefe & Huber Publishing Group, 2004. P.114-121.
- PICON, Antoine (2009). The Seduction of Innovative Geometries. In: OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert. **Theories of the Digital in Architecture**. Nova Iorque: Routledge, 2014, p.45-53.
- PICON, Antoine. Digital Culture and Architecture: Evolution or Revolution. In: **LIFE in:formation: On Responsive Information and Variations in Architecture**, ACADIA, 2010. ACADIA Proceedings. Nova Iorque: 2010. P.25
- PICON, Antoine. Robots and Architecture: Experiments, Fiction, Epistemology. In: GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias (eds.). **Made by Robots: Challenging Architecture at a Large Scale**. Architectural Design, Profile n 229. Londres: John Wiley & Sons, 2014.
- PRADO, Marshall; DORSTELMANN, Moritz; MENGES, Achim; SOLLY, James; KNIPPERS, Jan. Elytra Filament Pavilion: Robotic Filament Winding for Structural Composite Building Systems. In: MENGES, Achim; SHEIL, Bob; GLYNN, Ruairi; SKAVARA, Marilena (eds.). **Fabricate 2017: Rethinking Design and Construction**. Londres: UCL Press, 2017. Disponível em: <http://www.ucl.ac.uk/ucl-press/browse-books/fabricate>
- PRICE, Cédric (1979). **Public Talk**. Disponível em: <https://www.pidgeondigital.com/talks/technology-is-the-answer-but-what-was-the-question/>
- RIBEIRO, Darcy (1995). **O povo brasileiro: A formação e o sentido do Brasil**. São Paulo: Companhia das Letras, 2006.
- ROHDE, Clarice. Espaço e Tempo na Arquitetura Digital. In: **EBICC 2017: International Brazilian Meeting on Cognitive Science**, 11., 2017, São Paulo. Anais EBICC 2017. São Paulo: USP, 2017.
- SANTAELLA, Lucia. Pós-humano: por quê? In: **REVISTA USP**, São Paulo, n.74, p. 126-137, junho/agosto 2007. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/viewFile/13607/15425>
- SANTOS, Milton (2001). Entrevista. In: TENDLER, Silvio. **O Mundo Global visto do lado de cá** (documentário). 2002. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=-UUB5DW_mnM
- SCHWINN, Tobias; MENGES, Achim; Fabrication Agency: Landesgartenschau Exhibition Hall. In: MENGES, Achim (ed.) **Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational**, Architectural Design, Profile n 237. Londres: John Wiley & Sons, 2015.
- SCHWINN, Tobias. Landesgartenschau Exhibition Hall. In: MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, David. **Advancing Wood Architecture: A Computational Approach**. Londres: Routledge, 2017.
- SELF, Martin. Hooke Park: Applications for Timber in its Natural Form. In: MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, David (eds.). **Advancing Wood Architecture: A Computational Approach**. Londres: Routledge, 2017
- SELF, Martin; VERCRUYSSSE Emmanuel. Infinite Variations, Radical Strategies. In: MENGES, Achim; SHEIL, Bob; GLYNN, Ruairi; SKAVARA, Marilena (eds.). **Fabricate 2017: Rethinking Design and Construction**. Londres: UCL Press, 2017. Disponível em: <http://www.ucl.ac.uk/ucl-press/browse-books/fabricate>
- SHEIL, Bob. **Video 55/02: Manufactured Architecture in a Manufactured Landscape**. 2010. Disponível em: <https://>

www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=jjWMVM8jrNQ#

SOARES, Elisianne C. M. **Ciberespaço, vigilância e privacidade: o caso Google Street View**. Disponível em: <http://www.ciberlegenda.uff.br/index.php/revista/article/download/474/284>

STEENSON, Molly Wright. **The Architecture Machine Group and The Media Lab at Massachusetts Institute of Technology MIT**. Radical Pedagogies. Disponível em: <http://radical-pedagogies.com/search-cases/a13-architecture-machine-group-media-lab-massachusetts-institute-technology-mit/>

TERZIDIS, Kostas. **Algorithmic Architecture**. Oxford: Elsevier, 2006.

TESTA, Peter. **Robot House: Instrumentation, Representation, Fabrication**. Nova Iorque: Thames & Hudson, 2017.

TIBBITS, Skylar. Design to self-assembly. In: MENGES, Achim (ed.). **Material Computation: Higher Integration in Morphogenic Design**, Architectural Design, Profile n 216. Londres: John Wiley & Sons, 2012.

TOWNSEND, Alastair. On the Spline: A Brief History of the Computational Curve. In: ANDERSON, J.; JACKSON, M. **International Journal of Interior Architecture + Spatial Design: Applied Geometries**. IJ journal, v.3. Houston: University of Houston, 2014. Disponível em: <http://www.alatown.com/spline-history-architecture/>

TURING, Alan M. **Computing Machinery and Intelligence**. Mind, 59, p.433-460, 1950.

WEINER, Norbert (1948). **Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine**. Cambridge: The MIT Press, 1961.

WIENER, Norbert (1950). **Cibernética e Sociedade: O Uso Humano de Seres Humanos**. São Paulo: Cultrix, 1968.

WILLMANN, Jan; KNAUSS, Michael; BONWETSCH, Tobias; APOLINARSKA, Aleksandra Anna; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. Robotic timber construction — Expanding additive fabrication to new dimensions. In: **Automation in Construction**, V. 6, January 2016, P. 16-23. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580515002046>

WILLMANN, Jan; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. New paradigms of the automatic: robotic timber construction in architecture. In: MENGES, Achim; SCHWINN, Tobias; KRIEG, David. **Advancing Wood Architecture: A Computational Approach**. Londres: Routledge, 2017.

WITTGENSTEIN, Ludwig. **Tractatus Logico-Philosophicus**. Londres: Kegan Paul, Trench, Trubner, 1922. Disponível em: <https://www.gutenberg.org/files/5740/5740-pdf.pdf>

ŽIŽEK, SLAVOJ. From Virtual Reality to the Virtualization of Reality. In: DRUCKERY.T. (ed.). **Electronic Culture: Technology and Visual Representation**. Nova Iorque: Aperture, 1996, p.290-5.

Sites consultados

ARCHDAILY <https://www.archdaily.com.br/br/874036/coblogosubdv>

ARCHDAILY <https://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten>

ARCH_TEC_LAB <http://www.ita.arch.ethz.ch/archteclab/sequential-roof-.html>

Association for Robots in Architecture <http://www.robotsinarchitecture.org/>

CASA REVISTA <https://vimeo.com/130312585>

COMPUTER HISTORY <http://www.computerhistory.org/timeline/computers/>

Design + Make <http://designandmake.aaschool.ac.uk/>

Elytra Pavilion <http://www.elytra-pavilion.com/#page-top>

Eniac Programmers Project <http://eniacprogrammers.org/>

GRAMAZIO KOHLER RESEARCH <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/>

GRAMAZIO KOHLER RESEARCH - Gantenbein Vineyard Façade <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/52.html>

GRAMAZIO KOHLER RESEARCH - The Sequential Roof <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/201.html>

GRASSHOPPER 3D <http://www.grasshopper3d.com/>

ERNE <http://www.erne.net/de/mediathek/videos/>

HOOKE PARK <http://hookepark.aaschool.ac.uk/>

HOOKE PARK - Woodchip Barn <http://hookepark.aaschool.ac.uk/woodchip-barn/>

ICD <http://icd.uni-stuttgart.de/>

ICD – Elytra Filament Pavilion <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=16443>

ICD - Landesgartenschau Exhibition Hall <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11173>

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS <https://ifr.org/robot-history>

ITA - Institute of Technology in Architecture https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/arch/technology-in-architecture/ita-dam/documents/160922_PR_Arch_Tec_Lab_en.pdf

ITKE <http://www.itke.uni-stuttgart.de/>

LAMO <http://www.lamo.fau.ufrj.br/>

LAPAC <http://lapac.fec.unicamp.br/>

METSA WOOD <https://www.metsawood.com/global/Pages/default.aspx>

MICHAELIS <http://michaelis.uol.com.br/>

RHINO3D <https://www.rhino3d.com/>

ROBOTS IN ARCHITECTURE <http://www.robotsinarchitecture.org/map-of-creative-robots>

ROB Technologies <https://rob-technologies.com/>

TED https://www.ted.com/talks/chimamanda_adichie_the_danger_of_a_single_story

VITRUVIUS <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/09.105/77>

V&A Engineering Season <https://www.vam.ac.uk/info/engineering-season>

WikiHouse <https://wikihouse.cc/>

Wikipedia <https://www.wikipedia.org/>

6. LISTA DE IMAGENS

Capa: ICD/ITKE Research Pavilion 2014-2015. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=12965> _____ capa

Capítulo 1

Imagem 1: Casa Revista e alguns membros da equipe LAMO, 2015. Fonte: Acervo LAMO. _____ p. 3

Imagem 2: Interior da Casa Revista, 2015. Fonte: Acervo pessoal. _____ p. 3

Imagem 3: Workshop Em Busca da Forma, 2017. Anael Alves, Loan Tammela e Felipe Lannes. Fonte: Acervo LAMO. _____ p. 9

Imagem 4: Gantenbein Vineyard Façade, 2006. Fonte: Gramazio Kohler Research. <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/projekte/52.html> _____ p. 11

Imagem 5: The Sequential Roof, 2016. Fonte: ETH-Zurich, Arch_Tec_Lab. <https://www.ethz.ch/en/news-and-events/media-information/background-information/research-on-construction.html> _____ p. 11

Imagem 6: Landesgartenschau Exhibition Hall, 2014. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11173> _____ p. 12

Imagem 7: Elytra Filament Pavilion, 2016. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=16443> _____ p. 12

Imagem 8: Woodchip Barn, 2016. Fonte: Dezeen. <https://www.dezeen.com/2016/02/23/architectural-association-students-london-robotically-fabricated-barn-dorset-woodland/> _____ p. 13

Capítulo 2

Imagem 9: ENIAC, 1946. Fonte: Public Radio International. <https://www.pri.org/stories/2015-03-30/finding-forgotten-women-who-programmed-world-s-first-electronic-computer> _____ p. 18

Imagem 10: IBM System/360, 1965. Fonte: Computer History Museum. <http://www.computerhistory.org/revolution/mainframe-computers/7/161> _____ p. 18

Imagem 11: Ivan Sutherland e o Sketchpad GUI-based (Interface gráfica do usuário), 1962. Fonte: History of Computers. <http://history-computer.com/ModernComputer/Software/Sketchpad.html> _____ p. 19

Imagem 12: Arch Mac, MIT, 1967. Fonte: Radical Pedagogies. <http://radical-pedagogies.com/search-cases/a13-architecture-machine-group-media-lab-massachusetts-institute-technology-mit/> _____ p. 19

Imagem 13: Níveis de pretensão do uso de sistemas CAD. Fonte: CELANI et al., 2007. _____ p. 21

Imagem 14: The Water Pavilion, NOX, H2O Expo, 1993-1997. Fonte: Arcspace. <https://arcspace.com/bookcase/nox-machining-architecture/> _____ p. 22

Imagem 15: Port Authority Triple Bridge Gateway competition, Greg Lynn, 1994. Fonte: Greg Lynn. <http://glform.com/buildings/port-authority-triple-bridge-gateway-competition/> _____ p. 23

Imagem 16: Port Authority Triple Bridge Gateway competition, Greg Lynn, 1994. Fonte: Greg Lynn. <http://glform.com/buildings/port-authority-triple-bridge-gateway-competition/> _____ p. 23

Imagem 17: Diferenças entre computorização e computação. Fonte: HENRIQUES et al., 2017. _____ p. 25

Imagem 18: Rebstockpark Master Plan, Peter Eisenman, Frankfurt, 1990-91. Diagramas conceituais Fonte: Peter Eisenman. <http://www.eisenmanarchitects.com/rebstockpark.html#top> _____ p. 27

Imagem 19: Yokohama International Port Terminal, Foreign Office Architects, Japão, 1995–2002. Fonte: Archdaily. <https://www.archdaily.com/554132/ad-classics-yokohama-international-passenger-terminal-foreign-office-architects-foa> _____ p. 28

Imagem 20: Lewis Residence, Frank O. Gehry & Associates, 1989–1995. Frame geométrico do modelo em Catia 3D. Fonte: Yale News. <https://news.yale.edu/2014/01/02/yale-exhibition-highlights-pioneers-digital-architecture> _____ p. 29

- Imagem 21:** BMW Pavilion, Bernhard Franken, Munique, 1999. Fonte: Franken Architekten. <http://www.franken-architekten.de/index.php?page=projectdetail&lang=en&cat=0¶m=overview¶m2=21¶m3=0> _____ p. 31
- Imagem 22:** The Sequential Wall, Gramazio Kohler Research, ETH Zurich, 2008. Fonte: Gramazio Kohler Research. <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/lehre/148.html> _____ p. 32
- Imagem 23:** Algae-Cellunoi, marcosandmarjan, Guan Lee e Richard Beckett, instalação para a exposição ARCHILAB 2013 – Naturalizing Architecture, FRAC Centre, França, 2013. Fonte: Marjan Colletti. <http://marjan-colletti.blogspot.com.br/2013/10/archilab-at-frac.html> _____ p. 35
- Imagem 24:** Espaço morfológico da máquina n-dimensional e sua região de formas produzíveis. Fonte: MENGES, 2015a, p.95. _____ p. 36
- Imagem 25:** Modelo em bolha de sabão, Frei Otto, 1967. Fonte: Atelier Frei Otto Warmbronn. <https://www.detail-online.com/article/research-development-and-daring-frei-otto-wins-the-pritzker-prize-26524/> _____ p. 37
- Imagem 26:** Modelo para cálculo das forças atuantes na malha de cabos, Pavilhão Alemão da Feira Mundial de Montreal, 1967. Frei Otto, Rolf Gutbrod e Fritz Leonhardt. Fonte: Atelier Frei Otto Warmbronn. <https://www.detail-online.com/article/research-development-and-daring-frei-otto-wins-the-pritzker-prize-26524/> _____ p. 37
- Imagem 27:** Jean Nouvel, Instituto do Mundo Árabe, Paris, 1989. Fonte: Archdaily. <https://www.archdaily.com.br/br/755501/beyond-things-that-flicker-the-next-step-for-media-architecture> _____ p. 38
- Imagem 28:** Abertura adaptativa do Pavilhão HygroSkin: aberto sob baixa umidade, e fechado sob alta umidade relativa do ar. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=9869> _____ p. 38
- Imagem 29:** Carpal Skin, Neri Oxman, 2009-2010. Tala de punho em compósitos acrílicos, uma luva protetora para a Síndrome do Túnel do Carpo. Fonte: Neri Oxman. <https://web.media.mit.edu/~neri/sn>, 2014. <http://projects.carpalskin.com/carpalskin.html> _____ p. 39
- Imagem 30:** Minotaur Head with Lamella, Neri Oxman, 2012. Capacete protetor absorvente de choque capaz de flexionar e deformar. Fonte: Neri Oxman. <https://web.media.mit.edu/~neri/site/projects/lamella/lamella.html> _____ p. 39
- Imagem 31:** Logic Matter, Skylar Tibbits, 2011. Sistema de módulos de lógica digital mecânica passiva para montagem autoguiada de estruturas de larga escala. Fonte: Self Assembly Lab. <https://selfassemblylab.mit.edu/logic-matter/> _____ p. 40
- Imagem 32:** Evolução dos processos digitais descritos por Oxman e Oxman, 2014. Fonte: A autora (2018). _____ p. 43
- Imagem 33:** Slogan do Gmail entre 2004 e 2009, Google. Fonte: Tech World. <https://worldfortechie.blogspot.com.br/2015/01/build-advanced-gmail-filters-and.html> _____ p. 44
- Imagem 34:** Análise de Elementos Finitos do Caterpillar Gallery, construído na Universidade de Sevilha, 2014. Fonte: NARVÁEZ-RODRIGUEZ et al. 2014. _____ p. 45
- Imagem 35:** Esquema de retroação simples apresentado por Bertalanffy, 1968. Fonte: BERTALANFFY, 1968, p. 68. _____ p. 47
- Imagem 36:** Cibernética de segunda ordem. Fonte: Paul Pangaro. <http://www.pangaro.com/CUSO2014/Pangaro%20CUSO%202014%20CYBERNETICS%20Final.pdf> _____ p. 51
- Imagem 37:** Processo de Design Thinking co-evolucionário. Fonte: Paul Pangaro. <http://www.pangaro.com/CUSO2014/Pangaro%20CUSO%202014%20DESIGN%20Final.pdf> _____ p. 51
- Imagem 38:** Reconstrução do mapa de Roma a partir das coordenadas de Alberti. Fonte: Archinect. <https://archinect.com/forum/thread/141607095/parametric-details/50> _____ p. 53
- Imagem 39:** Receita de bolo de vó como algoritmo. Fonte: A autora (2018) a partir de imagem da internet. <https://>

- medium.com/bear-time/algorithms-ethnography-8e97666b94b4 _____ p. 57
- Imagem 40:** As Revoluções Industriais. Fonte: MENGES, 2015b, p.30. _____ p. 59
- Imagem 41:** Sistema ciber-físico de produção do ICD/ITKE Research Pavilion 2014–15. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=12965> _____ p. 62
- Capítulo 3**
- Imagem 42:** The Turk, ilustração do livro de Karl Gottlieb von Windisch, Briefe über den Schachspieler des Hrn. von Kempelen, 1783. Fonte: Wikimedia. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Turk-engraving-figure.jpg> _____ p. 67
- Imagem 43:** Diagrama de eixos, modelo KUKA KR15 /2. Fonte: Eurobots. <https://www.eurobots.net/kuka-robots-kr15-kr-15-2-p87-en.html> _____ p. 67
- Imagem 44:** Linha de soldagem com robôs Unimate, 1971. Fonte: International Federation of Robotics. <https://ifr.org/robot-history> _____ p. 70
- Imagem 45:** KUKA Famulus, 1973. Fonte: International Federation of Robotics. <https://ifr.org/robot-history> _____ p. 70
- Imagem 46:** KUKA Titan, 2007. Fonte: International Federation of Robotics. <https://ifr.org/robot-history> _____ p. 71
- Imagem 47:** FLATKN da Shimizu Corporation. O robô realiza acabamento em lajes de concreto. Fonte: BONWETSCH, 2015. _____ p. 71
- Imagem 48:** Máquina K2 de 5 eixos para processamento e produção de encaixes de madeira. Fonte: Hundegger. <https://www.hundegger.de/en/machine-building/products/joinery-machines.html> _____ p. 72
- Imagem 49:** Célula de fabricação com KUKA sobre trilhos durante a execução do trabalho TailorCrete, 2013. Fonte: Gramazio Kohler Research. <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/164.html> _____ p. 75
- Imagem 50:** Unidade móvel de fabricação R-O-B. Fonte: Gramazio Kohler Research. <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/135.html> _____ p. 76
- Imagem 51:** Robotic Prototyping Laboratory. Fonte: Gramazio Kohler Research. <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/lehre/228.html> _____ p. 76
- Imagem 52:** In situ Fabricator. Fonte: Gramazio Kohler Research. <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/324.html> _____ p. 77
- Imagem 53:** Robotic Fabrication Laboratory no novo edifício do Arch_Tec_Lab da ETH Zurich. Fonte: DFAB. <http://www.dfab.ch/events/new-robotic-fabrication-laboratory-sets-worldwide-standards-for-large-scale-robotic-fabrication-in-architecture/> _____ p. 77
- Imagem 54:** Robotic Fabrication Laboratory. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=18181> _____ p. 78
- Imagem 55:** Computational Construction Laboratory. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=18181> _____ p. 78
- Imagem 56:** Processo de simulação volumétrica através da força da gravidade. Fonte: Archdaily. <https://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten> _____ p. 82
- Imagem 57:** Diagrama da forma e da estrutura. Fonte: Archdaily. <https://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten> _____ p. 82
- Imagem 58:** Disposição dos tijolos sobre viga de concreto. Fonte: Archdaily. <https://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten> _____ p. 82
- Imagem 59:** Variação da angulação dos tijolos. Fonte: Archdaily. <https://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten> _____ p. 82
- Imagem 60:** Estudo da relação entre espaçamento, rotação e o espaço efetivo entre os tijolos. Fonte: BONWETSCH,

- 2015, p. 95. _____ p. 83
- Imagem 61:** Efeito visual da fachada. Fonte: Archdaily. <https://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten> _____ p. 84
- Imagem 62:** Set-up de fabricação. Fonte: International Academy of Ceramics. <http://www.aic-iac.org/editorial/architectes/gramazio-kohler/> _____ p. 85
- Imagem 63:** Deposição diferenciada da cola epóxi. Fonte: International Academy of Ceramics. <http://www.aic-iac.org/editorial/architectes/gramazio-kohler/> _____ p. 85
- Imagem 64:** Assentamento diferenciado dos tijolos. Fonte: International Academy of Ceramics. <http://www.aic-iac.org/editorial/architectes/gramazio-kohler/> _____ p. 85
- Imagem 65:** Montagem in loco da parede pré-fabricada na estrutura de concreto pré-moldado. Fonte: International Academy of Ceramics. <http://www.aic-iac.org/editorial/architectes/gramazio-kohler/> _____ p. 85
- Imagem 66:** Edifício Gantenbein Vineyard finalizado. Fonte: Archdaily. <https://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten> _____ p. 86
- Imagem 67:** Espaço interno fechado com chapas de policarbonato. Fonte: Archdaily. <https://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten> _____ p. 87
- Imagem 68:** CoBLOGó, SUBdV, 2014. Fonte: Archdaily. <https://www.archdaily.com.br/br/874036/coblogo-subdv> _____ p. 89
- Imagem 69:** Simulação da iluminância no ambiente a partir da variação da posição dos blocos. Fonte: Archdaily. <https://www.archdaily.com.br/br/874036/coblogo-subdv> _____ p. 89
- Imagem 70:** Processo de produção com moldes cortados digitalmente e assentamento manual dos blocos de concreto. Fonte: Archdaily. <https://www.archdaily.com.br/br/874036/coblogo-subdv> _____ p. 89
- Imagem 71:** Vista isométrica da cobertura, com 168 peças treliçadas apoiadas em estrutura de aço. Fonte: APOLINARSKA et al., 2016. <http://www.gramaziokohler.com/data/publikationen/1204.pdf> _____ p. 91
- Imagem 72:** Par de peças treliçadas com seus subsistemas. Isolamento e impermeabilização vão diretamente sobre a estrutura sem a necessidade de chapeamento. Fonte: APOLINARSKA, 2016. <http://www.gramaziokohler.com/data/publikationen/1204.pdf> _____ p. 91
- Imagem 73:** Camadas que compõem a peça treliçada. Fonte: ROB Technologies. <https://rob-technologies.com/timber-construction/> _____ p. 91
- Imagem 74:** Esquema do fluxo de trabalho computacional. Fonte: APOLINARSKA et al., 2016. <http://www.gramaziokohler.com/data/publikationen/1204.pdf> _____ p. 92
- Imagem 75:** Etapas de solução do nó. Situação inicial com áreas de sobreposição; primeiros pregos de fixação e área viável remanescente; distribuição subsequente na décima iteração; situação quase completa onde se evitou sobreposições de área de influência de cada prego. Fonte: APOLINARSKA et al., 2016. <http://www.gramaziokohler.com/data/publikationen/1204.pdf> _____ p. 93
- Imagem 76:** Iterações executadas onde são mapeados a quantidade de pregos faltantes (preto), os já locados (cinza escuro) e o excedente máximo possível (cinza claro). Fonte: APOLINARSKA et al., 2016. <http://www.gramaziokohler.com/data/publikationen/1204.pdf> _____ p. 93
- Imagem 77:** Distribuição final dos pregos a ser processada na fabricação. Fonte: ROB Technologies. <https://rob-technologies.com/timber-construction/> _____ p. 93
- Imagem 78:** Estudo com domo de luz para análise da transmissão de luz através da estrutura de multicamadas. Fonte: GRAMAZIO, 2014a. _____ p. 94

- Imagem 79:** Processo de fabricação das treliças planas. Fonte: ITA. <http://www.ita.arch.ethz.ch/archteclab/sequential-roof-.html> _____ p. 95
- Imagem 80:** Posicionamento das peças treliçadas sobre estrutura de aço. Fonte: ITA. <http://www.ita.arch.ethz.ch/archteclab/sequential-roof-.html> _____ p. 95
- Imagem 81:** Detalhe da superfície interna. Fonte: ROB Technologies. <https://rob-technologies.com/timber-construction/> _____ p. 96
- Imagem 82:** Resultado final da superfície no interior do edifício com variações de densidade. Fonte: ETH. <https://www.ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2016/09/research-on-construction.html> _____ p. 97
- Imagem 83:** Planta de situação. Landesgartenschau Exhibition Hall, 2014. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11173> _____ p. 103
- Imagem 84:** Vista interna do pavilhão, com padronagem diferenciada das placas de madeira. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11173> _____ p. 103
- Imagem 85:** Princípio biomimético inspirado na bolachas-do-mar e suas microscópicas conexões. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11173> _____ p. 104
- Imagem 86:** Planos de intersecção da superfície de dupla curvatura. Superfície sinclástica de curvatura Gaussiana positiva e superfície anticlástica de curvatura Gaussiana negativa. Fonte: KRIEG et al., 2014. <http://www.springer.com/gp/book/9783319114170> _____ p. 104
- Imagem 87:** Limitações de fabricação como agentes de design: retângulo de contorno do material disponível e círculo da área de trabalho do robô. Fonte: KRIEG et al., 2014. <http://www.springer.com/gp/book/9783319114170> _____ p. 105
- Imagem 88:** Modelo de elementos finitos e forças atuantes nos nós: na direção x ocorrem as forças axiais e de momento, na direção y forças de cisalhamento no plano e na direção z forças de cisalhamento fora do plano. Fonte: KRIEG et al., 2014. <http://www.springer.com/gp/book/9783319114170> _____ p. 105
- Imagem 89:** Forças atuantes nas junções. Fonte: KRIEG et al., 2014. <http://www.springer.com/gp/book/9783319114170> _____ p. 106
- Imagem 90:** Detalhamento da conexão em junção tipo dedos. Fonte: KRIEG et al., 2014. <http://www.springer.com/gp/book/9783319114170> _____ p. 106
- Imagem 91:** Cabine de fabricação robótica. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11173> _____ p. 107
- Imagem 92:** Detalhe da fabricação da conexão em junção tipo dedos. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11173> _____ p. 107
- Imagem 93:** Aferição a laser das placas fabricadas para controle de precisão e comportamento do material. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11173> _____ p. 108
- Imagem 94:** Montagem das placas sobre esqueleto em madeira. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11173> _____ p. 108
- Imagem 95:** Sobre as placas de 50mm vão as camadas subsequentes: barreira de vapor, aglomerado de madeira 35mm, borracha de impermeabilização EPDM, sarrafos e revestimento em chapas de madeira compensada tratada. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11173> _____ p. 108
- Imagem 96:** Pavilhão finalizado. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11173> _____ p. 109
- Imagem 97:** Elytra Filament Pavilion, Victoria & Albert Museum, 2016. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=16443> _____ p. 111
- Imagem 98:** Imagens de élitros de besouros, por tomografia micro computadorizada (Micro CT) e mi-

croscópio eletrônico de varredura (SEM scan). Fonte: PARASCHO et al, 2014. <http://www.springer.com/gp/book/9783319114170> _____ p. 112

Imagem 99: Modelo de elementos finitos do ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=8807> _____ p. 113

Imagem 100: ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14, de forma ativa. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=8807> _____ p. 113

Imagem 101: Processo de enrolamento sem núcleo (coreless winding) onde as fibras geram tensão umas sobre as outras e um enrolamento helicoidal gera uma curvatura negativa. Fonte: PARASCHO et al., 2014. <http://www.springer.com/gp/book/9783319114170> _____ p. 114

Imagem 102: Sintaxe de enrolamento e suas diferentes camadas. Fonte: KNIPPERS et al., 2016. <https://www.researchgate.net/publication/313421984> _____ p. 114

Imagem 103: Diagrama de forças em células de diferentes aberturas. Fonte: PRADO et al., 2017. www.ucl.ac.uk/ucl-press _____ p. 115

Imagem 104: Célula fabricada. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=16443> _____ p. 115

Imagem 105: Estratégia de design e fabricação integrados do ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11187> _____ p. 116

Imagem 106: Set-up de fabricação com dois robôs síncronos, ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=16443> _____ p. 117

Imagem 107: Diagrama dos end-effectors ajustáveis para determinação da posição dos vértices de cada componente. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=16443> _____ p. 117

Imagem 108: Set-up de fabricação do Elytra Filament Pavilion. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=16443> _____ p. 118

Imagem 109: Detalhe dos pontos de controle do módulo e o dispensador de fio como end-effector do robô. Fonte: V&A. <https://www.vam.ac.uk/exhibitions/elytra-filament-pavilion> _____ p. 118

Imagem 110: Diagrama da sequência de enrolamento das fibras. Fonte: PRADO et al., 2017. www.ucl.ac.uk/ucl-press _____ p. 119

Imagem 111: Robô em performance de fabricação durante a exposição. Fonte: ICD. <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=16443> _____ p. 120

Imagem 112: Mapeamento das condições de conforto térmico e movimento dos visitantes. Fonte: V&A. <https://www.vam.ac.uk/exhibitions/elytra-filament-pavilion> _____ p. 121

Imagem 113: Treliza espacial que suporta a cobertura do celeiro. Fonte: Hooke Park. <http://hookepark.aaschool.ac.uk/woodchip-barn/> _____ p. 125

Imagem 114: Ilustração da Encyclopédie Méthodique (1782) de peças de madeira para embarcações em diferentes ramificações das árvores. Fonte: MOLLICA e SELF, 2016. _____ p. 126

Imagem 115: 40 forquilhas selecionadas através de análise por script de seu perfil 2D, 25 árvores (coloridas) derubadas e escaneadas em 3D. Fonte: Hooke Park. <http://hookepark.aaschool.ac.uk/woodchip-barn/> _____ p. 126

Imagem 116: Mesh do tronco que deu origem a círculos transversais e a curva medial da geometria através de seus centroides. Fonte: MOLLICA e SELF, 2016. <http://vdf.ch/advances-in-architectural-geometry-2016.html> _____ p. 127

Imagem 117: Script de otimização da distribuição e encontro entre as forquilhas de madeira. Fonte: MOLLICA e SELF, 2016. <http://vdf.ch/advances-in-architectural-geometry-2016.html> _____ p. 127

Imagem 118: Modelo final extraído do script de otimização com todos os referenciais para fabricação. Fonte:

MOLLICA e SELF, 2016. <http://vdf.ch/advances-in-architectural-geometry-2016.html> _____ p. 128

Imagem 119: Fabricação das junções entre as peças. Fonte: Hooke Park. <http://hookepark.aaschool.ac.uk/wood-chip-barn/> _____ p. 128

Imagem 120: Montagem indoor da primeira metade da treliça. Fonte: Design + Make. <http://designandmake.aaschool.ac.uk/project/wood-chip-barn/> _____ p. 128

Imagem 121: Montagem da estrutura no local. Fonte: Design + Make. <http://designandmake.aaschool.ac.uk/project/wood-chip-barn/> _____ p. 128

Imagem 122: Isometria explodida. Fonte: Dezeen. <https://www.dezeen.com/2016/02/23/architectural-association-students-london-robotically-fabricated-barn-dorset-woodland/> _____ p. 129

Imagem 123: Woodchip Barn finalizado. Fonte: Dezeen. <https://www.dezeen.com/2016/02/23/architectural-association-students-london-robotically-fabricated-barn-dorset-woodland/> _____ p. 130

Imagem 124: Mapa dos robôs aplicados no mundo na indústria criativa. Fonte: Association for Robots in Architecture, com edição da autora. <http://www.robotsinarchitecture.org/map-of-creative-robots> _____ p. 134

7. ANEXOS

ANEXO 1

Publicações - Gramazio Kohler Research

2014



AD Made by Robots -
Challenging Architecture
at a Larger Scale

Architectural Design

2014



FABRICATE - Negotiating
Design and Making

gta Publishers

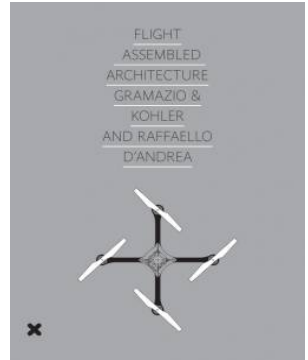
2014



The Robotic Touch -
How Robots Change
Architecture

Park Books

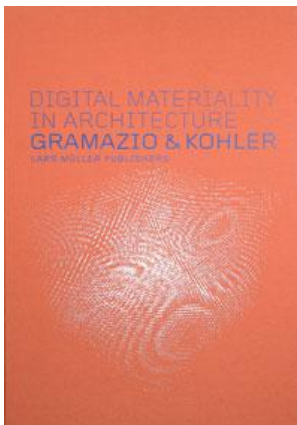
2013



Flight Assembled
Architecture

Editions Hyx

2008



Digital Materiality in
Architecture
Lars Müller Publishers

ANEXO 2

Publicações - Institute for Computational Design and Construction

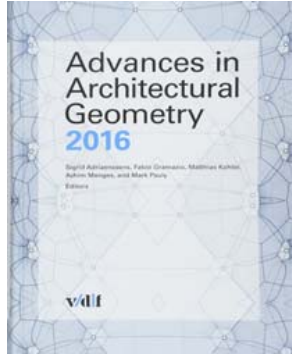
2017



Fabricate – Rethinking Design and Construction

UCL Press

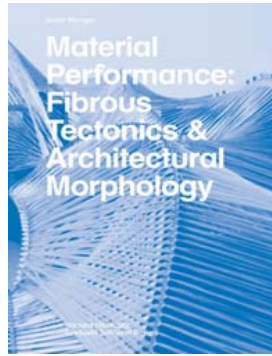
2016



Advances in Architectural Geometry 2016

vdf Hochschulverlag AG
ETH Zurich

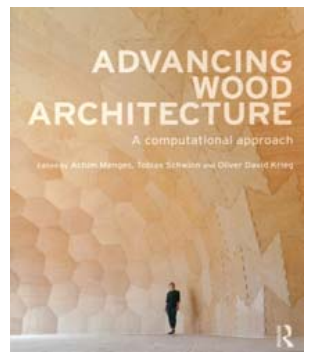
2016



Material Performance –
Fibrous Tectonics &
Architectural
Morphology

Harvard University GSD

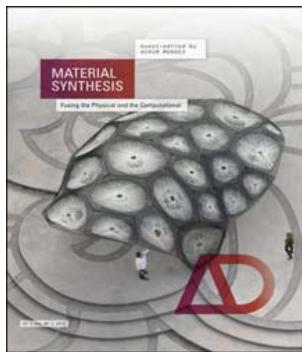
2016



Advancing Wood
Architecture – A
Computational
Approach

Routledge

2015



Material Synthesis –
Fusing the Physical and
the Computational

Wiley Academy

2015



Robotic Futures

Tongji University Press

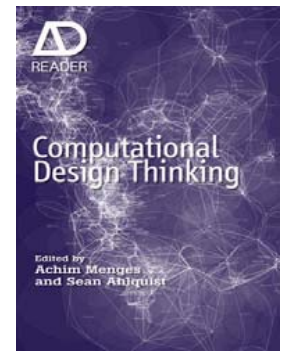
2012



Material Computation –
Higher Integration in
Morphogenetic Design

Wiley Academy

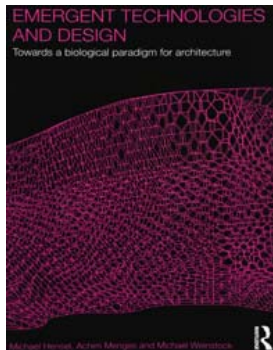
2011



Computational Design
Thinking

John Wiley and Sons

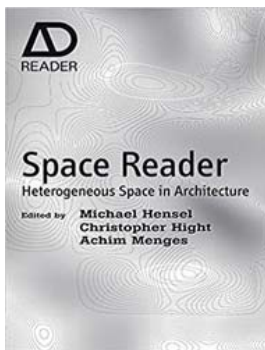
2010



Emergent Technologies
and Design

Routledge

2009



Space Reader:
Heterogeneous Space in
Architecture

John Wiley and Sons

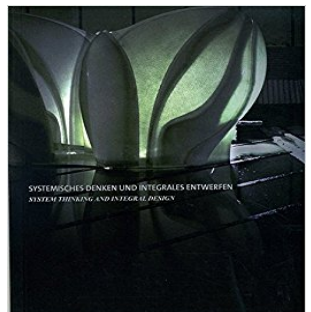
2008



Form Follows
Performance: Zur
Wechsel-wirkung von
Material

ArchPlus Verlag

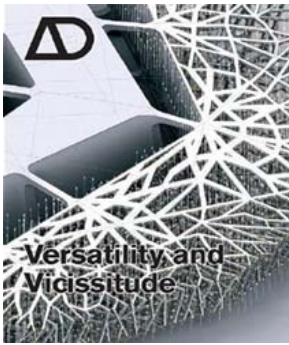
2008



Systemisches Denken
und Integrales
Entwerfen – System
Thinking and Integral
Design

Hochschulverlag HFG
Offenbach

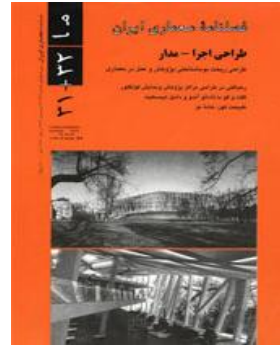
2008



Versatility and Vicissitude: Performance in Morpho-Ecological Design

Wiley Academy

2008



Performance-Oriented Design: Morpho-Ecological Design

Iranian Architecture Publications

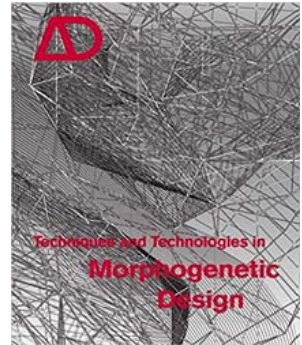
2006



Morpho-Ecologies

AA Publications

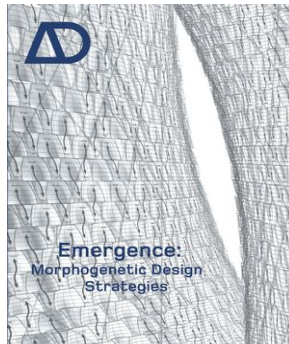
2006



Techniques and Technologies in Morphogenetic Design

Wiley Academy

2004






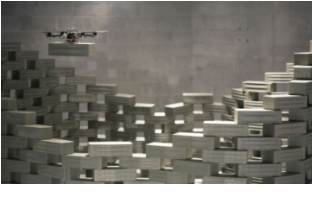


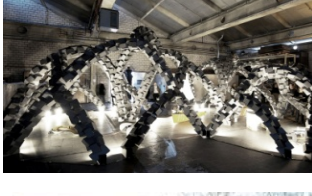



Emergence – Morphogenetic Design Strategies







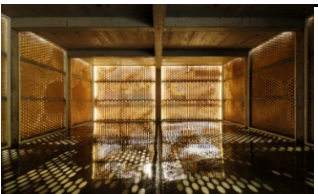
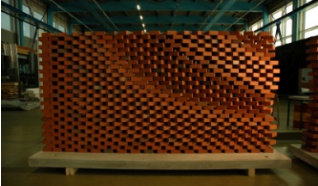
Wiley Academy

ANEXO 3

Projetos - Gramazio Kohler Research









	Ano	Projeto	Materiais	Ferramentas	Processo Fabricação
	2018	Villa Bernasconi Iridescence Print	Plástico ABS	Braço robótico como impressora 3D	Impressão 3D de forma livre
	2014- 2018	Robotic Lightweight Structures Research	Tubos de metal	Braços robóticos sincrônicos e solda manual	Robô para posicionamento da peça, solda manual
	2014- 2018	On-site Robotic Construction Research	Tijolo padronizado	Braço robótico sobre chassi móvel	Desenvolviment o de plataforma de design computacional e simulação
	2017	The Robotic Pavilion	Sarrafos de madeira, pregos e revestimento de madeira	Braço robótico e montagem manual	Pré-fabricação automatizada da estrutura de madeira
	2017	Robotic Cosmogony	Insalação sonora com partículas	Braços robóticos sincrônicos, falantes	Ondas sonoras controlam partículas no espaço
	2017	Sisyphus	Instalação com grãos de areia	Robô específico que suga areia e a deposita novamente	Robô forma paisagens de areia
	2012- 2017	Complex Timber Structures Research	Sarrafos de madeira, cola e prego	Braço robótico, serra de bancada automatizada, adesivo e scanner	Manipulação robótica dos sarrafos com preparação automatizada e adesivo manual
	2016- 2018	Spatial Timber Assemblies Research	Sarrafos de madeira com manipulação totalmente automatizada	Braços robóticos sincrônicos, serra circular, pistola de prego.	Pré-fabricação automatizada da estrutura de madeira
	2016	The Sequential Roof	Sarrafos de madeira com manipulação totalmente automatizada	Robô em pórtico, serra circular, pistola de prego.	Pré-fabricação automatizada da estrutura de madeira










	2015	Iridescence Print	Plástico ABS	Braço robótico com impressora 3D	Impressão 3D de forma livre
	2015	Rock Print	Insatlação de pedras e cadaço	Braço robótico	Impressão com pedra, o cadaço guia as capacidade de agregação das pedras
	2014	Robotic Foldings	Papel e cola	Braço robótico, dispositivo de corte e dobra, dispense de cola	Corte e montagem de pedaços de papel diferenciados
	2012	Flight Assembled Architecture	Módulos genéricos	Drone	Montagem aérea
	2011	The Endless Wall	Tijolo padronizado	Braço robótico sobre chassi móvel	Montagem com resposta em tempo real
	2011	Stratifications	Pedaços desiguais de madeira	Braço robótico	Montagem com resposta em tempo real
	2010	The Catenary Pavilion	Módulos de poliestireno com corte diferenciado	Braço robótico, fio quente	Corte diferenciado das peças
	2010	Flexbrick Research	Tijolo padronizado	Braço robótico Software	Desenvolvimento de plataforma de design computacional e simulação
	2010	The Sequential Structure Teaching	Sarrafo de madeira e prego	Braço robótico Serra de bancada	Pré-fabricação automatizada da estrutura de madeira
	2009	The Opening Teaching	Sarrafo de madeira e prego	Braço robótico Serra de bancada	Pré-fabricação automatizada da estrutura de madeira







	2009	Pike Loop	Tijolo padronizado	Braço robótico em container, dispenser de cola	Montagem <i>in loco</i>
	2009	The Stacked Pavilion	Sarrafos de madeira	Braço robótico	Pré-fabricação automatizada da estrutura de madeira
	2008	Architonic Concept Space	Módulos de poliestireno	Braço robótico, fio quente	Corte diferenciado das peças, montagem
	2008	Structural Oscillations	Tijolo padronizado	Braço robótico em container, dispenser de cola	Pré-montagem
	2008	Superwood	Madeira	Braço robótico	Usinagem das peças
	2008	The Sequential Wall Teaching	Sarrafo de madeira e prego	Braço robótico Serra de bancada	Pré-fabricação automatizada da estrutura de madeira
	2006	Gantenbein Vineyard Facade	Tijolo padronizado	Braço robótico, dispenser de cola	Montagem pré-fabricada dos painéis
	2006	The Programmed Wall Teaching	Tijolo padronizado	Braço robótico	Pré-montagem

ANEXO 4

Projetos - Institute for Computational Design and Construction









	Ano	Projeto	Materiais	Ferramentas	Processo Fabricação
	2017	Sewn Timber Shell	Lâminas de madeira compensada	Braço robótico, máquina de costura industrial	Corte e montagem dos módulos através de costura robotizada
	2017	ICD Aggregate Wall	Compósito	Molde de injeção	Pré-fabricação das peças e montagem manual
	2017	Segmented Timber Shell - TRR141-A07	Chapa de compensado 20mm	Router CNC e braço robótico	Pré-corte e fabricação dos encaixes, montagem manual
	2017	MoRFES_01 : Mobile Robotic Fabrication Eco-System	Fibra compósita, parafusos como pontos e fixação na parede	Wall climber robot, e thread walker robot	Robôs específicos em sincronia no enrolamento das fibras
	2017	Digital Transformer: Mercedes-Benz Concept IAA	Peças do chassi do carro	Software personalizado	Desenvolvimento de software de design computacional generativo
	2017	Elytra Filament Pavilion Vitra Campus	Fibra compósita	Braço robótico	Pré-fabricação de peças de fibra enrolada
	2016/ 2017	ICD/ITKE Research Pavilion	Fibra compósita	Braço robótico e drone	Fabricação do pavilhão monolítico em fibra enrolada
	2016	Elytra Filament Pavilion Victoria and Albert Museum	Fibra compósita	Braço robótico	Pré-fabricação de peças de fibra enrolada








	2015/ 2016	ICD/ITKE Research Pavilion	Lâminas de madeira compensada	Braço robótico e máquina de costura	Corte e montagem dos módulos através de costura robotizada
	2015	University of Stuttgart Fair Stand	Fibra compósita	Braço robótico	Pré-fabricação de peças de fibra enrolada
	2015	Hive: A Human and Robot Collaborative Building Process	Cabos Bambu Peças personalizadas para montagem	Braço robótico, IOT	Pré-fabricação dos módulos tensegrity, montagem responsiva
	2015	ICD Aggregate Pavilion	Compósito	Molde de injeção, cable robot	Montagem por gravidade e aérea
	2014- 2015	ICD/ITKE Research Pavilion	Fibra compósita	Braço robótico, scanner em tempo real	Fabricação <i>in loco</i> sob superfície pneumática com fibra enrolada
	2014	Landesgartenschau Exhibition Hall	Chapa de compensado 50mm	Router CNC, braço robótico e scanner a laser	Pré-corte e fabricação dos encaixes, montagem manual
	2014	Leichtbau BW Installation	Chapa de fibra de carbono, reforço em fibra compósita	Router CNC e costura CNC 2D	Pré-fabricação de peças com fibra costurada
	2013/ 2014	ICD/ITKE Research Pavilion	Fibra compósita	Braços robóticos sincrônicos	Pré-fabricação de peças de fibra enrolada
	2013	Material Equilibria Installation	Fio teado diferenciado e barras de polímero	Máquina de tear CNC	Pré-fabricação das peças teadas, montagem manual

	2013	Textile Hybrid M1: La Tour de l'Architecte	Barras de polímero reforçado com fibra de vidro e tecido tensionado	Máquina de tear CNC	Pré-fabricação das peças teadas, montagem manual
	2012	ICD/ITKE Research Pavilion	Fibra compósita	Braço robótico	Fabricação do pavilhão monolítico em fibra enrolada
	2012	HygroScope: Meteorosensitive Morphology	Estrutura de madeira, copósitos sintéticos e folha de madeira	Corte a laser, braço robótico	Estrutura fabricada por robô
	2011	HygroSkin: Meteorosensitive Pavilion	Lâminas de madeira compensada, camadas de isolamento	Braço robótico	Pré fabricação dos módulos, montagem manual
	2011	ICD/ITKE Research Pavilion	Chapa de compensado 6.5mm	Router CNC e braço robótico	Pré-corte e fabricação dos encaixes, montagem manual
	2010	ICD/ITKE Research Pavilion	Lâminas de madeira compensada 6.5 mm	Braço robótico	Corte 2D e montagem manual

ANEXO 5

Projetos - Hooke Park

	Ano	Projeto	Materiais	Ferramentas	Processo Fabricação
	2017	Sawmill Shelter	Troncos brutos, sarrafos, chapas de alumínio, chapas de compensado	Serra, router CNC, equipamento para dobra com vapor quente	Kerfing de troncos brutos, junções dos sarrafos, montagem com tensionamento
	2016	WoodChip Barn	Troncos de árvore local	3D scanner, braço robótico, moto serra	Scanneamento do material, produção robotizada das peças, montagem
	2015	Biomass Boiler House	Troncos de árvore local	3D-scanner, serra de fita e serra elétrica customizadas	Scanneamento do material, montagem das peças brutas
	2014	South Lodge	Estrutura de madeira, revestimento de madeira e materiais reciclados	Marcenaria tradicional	Construção em madeira tradicional
	2014	Inhabitable Tetrahedron <i>Estrutura habitável</i>	Madeira local, cabos e tecido tensionado		Frame de madeira oco com cabos para tencionamento
	2014	Timber Seasoning Shelter	Sarrafos, membrana de PVC e poliéster tensionada, estrutura metálica	Serra, gabarito de flexão pneumático, vapor quente	Junções dos sarrafos, kerfing dos sarrafos, montagem
	2012	Caretaker's House	Madeiras verdes locais	Marcenaria tradicional	Construção ecológica em madeira verde com isolamento e estanqueidade passivos
	2012	Big Shed	Troncos brutos de árvore, parafusos específicos, revestimento em madeira e alumínio	Marcenaria tradicional	Desenvolvimento de conexões e parafusos específicos para a construção com peças roliças

	2012	Accumulating Watchtower <i>Estrutura habitável</i>	Troncos brutos de árvore, cordas para amarração	Marcenaria tradicional	Construção sem projeto, a partir de acumulação de elementos
	2011	Cocoon <i>Estrutura habitável</i>	Chapas de madeira compensada e lâminas de madeira local	Router CNC e marcenaria tradicional	Esqueleto usinado e revestimento com lâminas de madeira dobradas
	2009	Driftwood Pavilion <i>AA Summer Pavilion</i>	Chapas de madeira compensada, conectores de aço	Router CNC e marcenaria tradicional	
	2008	Swoosh Pavilion <i>AA Summer Pavilion</i>	Chapas de madeira compensada, piso pré-fabricado	Router CNC, serra tico-tico de mão	
	2007	Bed Hair Pavilion <i>AA Summer Pavilion</i>	Chapas de madeira compensada, conectores de aço, grampos, cola	Router CNC e marcenaria tradicional	
	2006	Fractal Pavilion <i>AA Summer Pavilion</i>	Chapas de madeira compensada, conectores de aço, cabos, chapas de PVC	Router CNC e marcenaria tradicional	
	1995	Westminster Lodge	Madeiras verdes locais troncos brutos e laminados	Marcenaria tradicional	Construção em madeira roliça comprimida, telhado verde
	1989	Workshop	Troncos brutos de árvore, membrana de PVC	Marcenaria tradicional	Construção em madeira roliça comprimida
	1987	Prototype House	Troncos brutos de árvore, placas laminadas de madeira para revestimento	Marcenaria tradicional	Construção em madeira roliça tensionada

"Amar e mudar as coisas me interessa mais."

Belchior