

**TESE DE DOUTORADO
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
TECNOLOGIA, AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE
TÉCNICAS E PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**

IGOR LACROIX

**ROTEIRO DE PRODUÇÃO DIGITAL:
PROCESSO CAEDM PARA PROJETO PARAMÉTRICO
E FABRICAÇÃO DIGITAL EM ARQUITETURA**

Brasília – DF

2020

IGOR LACROIX

**ROTEIRO DE PRODUÇÃO DIGITAL:
PROCESSO CAEDM PARA PROJETO PARAMÉTRICO
E FABRICAÇÃO DIGITAL EM ARQUITETURA**

**DIGITAL PRODUCTION SCRIPT:
CAEDM PROCESS FOR PARAMETRIC DESIGN
AND DIGITAL FABRICATION IN ARCHITECTURE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília para obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração: Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade.

Orientador: Professor Doutor Neander Furtado Silva

Brasília – DF

2020

Autorizo a reprodução total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Data: 20/03/2020

IGOR LACROIX

ROTEIRO DE PRODUÇÃO DIGITAL: PROCESSO CAEDM PARA PROJETO PARAMÉTRICO E FABRICAÇÃO DIGITAL EM ARQUITETURA.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília para obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Aprovada em: 20/03/2020

Banca Examinadora:

Professor Doutor Neander Furtado Silva – Orientador PPG/FAU/UnB

Professor Doutor Franciso Leite Aviani – Membro Titular PPG/FAU/UnB

Professor Doutor Félix Alves da Silva Júnior – Membro Titular FT/UnB

Professora Doutora Alessandra Beatriz Carneiro Gonçalves Alves – Membro Titular Eng. Civil/UFTM

Professor Doutor Fábio Ferreira de Lima – Suplente Arquitetura/UFG

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha filha Luise para quem tenho me esforçado em me tornar um ser humano melhor. Em memória de Altair Mendes Lacroix, meu pai, a quem devo tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Neander Furtado Silva por toda a generosidade compartilhada e dedicação a este trabalho de tese.

Agradeço ao Professor Doutor José Pedro Sousa pelas oportunidades e orientações especiais.

Agradeço à Maria Tereza Lacroix, minha mãe, por todo o suporte.

Agradeço à Carla Barreto pelo amor na vida e todo o apoio durante este trabalho de tese de doutorado.

Ao arquiteto Paulo Henrique Paranhos, por ter compartilhado um projeto de sua autoria para que juntos pudéssemos explorar novas técnicas de projeção.

Ao Coletivo *Voxel Lab* composto pelos arquitetos Felipe Sanches, Filipe Fuentes, Gabriel Lago, Guilherme Rabelo, Guilherme Santoucy, João Paulo de Castro e Marco Maron. Sem vocês nada disso teria sido possível!

Ao Vicente Muñoz que me concedeu entrevista reveladora de muitas possíveis frentes de pesquisa sobre a obra de Lelé.

Ao Professor Doutor Alex Calheiros por todas as oportunidades no campo da arte, em especial a possibilidade de realizar a residência artística na Casa de Cultura de América Latina.

À Beatriz de Abreu e Lima, amiga arquiteta que compartilhou tantas ideias sobre cultura digital e processos de projeto de arquitetura.

Ao Lucas De Sordi, amigo arquiteto que compartilhou um importante momento da vida profissional, durante o período deste trabalho.

À Professora Doutora Alexandra Paio por todas as oportunidades a mim oferecidas.

Ao Professor Doutor Paulo Eduardo Fonseca de Campos pela importante entrevista concedida em Coimbra.

A François Roche, Stephanie Lavaux, Jean Navarro, Stephan Henrich, Camille Lacadee, Gaëtan Robillard, Antoine Gassion, Delphine Chevrot, Cesar Daoud, Daniel Fernández Florez, Alexander Römer e Clarice Labro, por todo conhecimento generosamente compartilhado, no início da carreira na área da tecnologia aplicada à arquitetura.

Aos arquitetos Ernesto Bueno e Victor Sardenberg, que compartilharam seus conhecimentos sobre modelagem algorítmica para meu aprendizado na área.

À equipe de arquitetos pesquisadores do *DFL FAUP*, Pedro Varela, Rafael Santos e João Carvalho, que compartilharam seus conhecimentos sobre a prática de fabricação robótica.

Aos produtores Fábio Sucupira Pedroza, Miguel Galvão e Marcelo Barki, pelos patrocínios para realização das estruturas leves aqui apresentadas.

“O Lelé é o arquiteto que eu gostaria de ter sido.”

Lucio Costa em depoimento a Haroldo Pinheiro (2011).

RESUMO

A tese consiste na pesquisa sobre a integração da fabricação digital e de processos de engenharia como parâmetros do projeto de arquitetura, ao utilizar um método de roteirização da produção. A roteirização de produção digital, por meio de *Building Information Modeling – BIM*, utilizando-se um processo *Computer-Aided Engineering, Design and Manufacturing – CAEDM*, criado no software *Grasshopper®*, para o projeto arquitetônico e pré-fabricação, compôs os elementos de investigação. Examinar e evidenciar a aplicação de produção digital em arquitetura por meio de experimentos de roteirização do projeto arquitetônico, afim de responder aos problemas de construção civil controlada por computador, foi o principal objetivo da investigação. Para a composição da tese foram realizados três experimentos que testaram a aplicação da produção digital no projeto arquitetônico. O projeto da cobertura da Catedral de Palmas – TO, de autoria do arquiteto Paulo Henrique Paranhos, foi o primeiro experimento e buscou compreender como métodos de parametrização podem ser utilizados na prática arquitetônica comum. A produção de estruturas leves, em colaboração com o Coletivo *Voxel Lab*, ajudou a compreender como utilizar a técnica em processos comuns de construção e montagem das estruturas, em um segundo experimento. Por último, um experimento que organizou, em um único modelo algorítmico, um processo de projeto e fabricação que consiste em sistema generativo capaz de reproduzir métodos utilizados por João Filgueiras Lima, Lelé, para execução do Memorial Darcy Ribeiro, Beijódromo, em Brasília – DF, automatizando-se etapas do projeto arquitetônico por meio de técnicas de parametrização, com a intenção de criar um processo *file-to-factory*. Reconhece-se a precursão de Lelé no uso da fabricação digital para justificar uma pesquisa que avance seu legado. Revela-se, assim, um roteiro capaz de processar a produção digital em arquitetura, considerando-se aspectos como a sua aplicação pela parametrização, o trabalho experimental e laboratorial envolvido, e o panorama teórico e histórico da fabricação digital.

PALAVRAS-CHAVE

Produção Digital; Projeto Paramétrico; Fabricação Digital; Projeto Arquitetônico; Roteirização.

ABSTRACT

The thesis consists of research on the integration of digital fabrication and engineering processes as parameters of architectural design, using a production scripting method. The digital production scripting, through Building Information Modeling – BIM, using a Computer-Aided Engineering, Design and Manufacturing – CAEDM process, created in Grasshopper® software, for architectural design and prefabrication, composed the elements of investigation. The main goal of the investigation was to examine and evidence the application of digital production in architecture through experiments of scripting architectural design, in order to respond to the problems of computer-aided construction. For the composition of the thesis, we carried out three experiments in order to test the application of digital production in architectural design. The design for the covering of Palmas Cathedral, by architect Paulo Henrique Paranhos, was the first experiment and sought to understand how parameterization methods could be used in common architectural practice. The production of lightweight structures, in collaboration with Voxel Lab Collective, helped to understand how to use the technique in common processes of construction and assembly of the structures, in a second experiment. Finally, an experiment that organized, in a single algorithmic model, a design and manufacturing process which consists of a generative system capable of reproducing methods that João Filgueiras Lima, Lelé, used in the building of Darcy Ribeiro Memorial, Beijódromo, in Brasília, automating steps of the architectural design through parameterization techniques, in order to create a file-to-factory process. We recognize Lelé's originality in the use of digital fabrication to justify a research that advances his legacy. Thus, a script capable of processing digital production in architecture is revealed, considering aspects such as: its application through parameterization, the experimental and laboratory work involved, and the theoretical and historical panorama of digital fabrication.

KEYWORDS

Digital Production; Parametric Design; Digital Fabrication; Architectural Design; Scripting.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de cidade roboticamente construída, intitulada “ <i>I’ve heard about</i> ”.	56
Figura 2 – Projeto de habitação multifuncional, intitulado “ <i>He Shot Me Down</i> ”.	56
Figura 3 – Projeto para concurso de arquitetura <i>FRAC</i> Orléans, intitulado “ <i>Olzweg</i> ”.	57
Figura 4 – Pavilhão da Suíça na Bienal de Arquitetura de Veneza.	58
Figura 5 – “ <i>The Informed Wall</i> ”	59
Figura 6 – Experimento realizado no <i>ETH</i> Zurique, intitulado “ <i>Tilted Holes</i> ”.	60
Figura 7 – Experimento de construção robótica em canteiro de obras.	62
Figura 8 – Maquetes palpáveis de experimento de aplicação da fabricação robótica para construções em larga escala.	64
Figura 9 – Técnica de molde deslizante controlado roboticamente para fabricação de concreto.	65
Figura 10 – Experimento de conexão de barras de alumínio por controle robótico.	66
Figura 11 – Experimento de construção robótica de estrutura metálica para concreto armado, intitulado “ <i>Mesh Mould</i> ”.	66
Figura 12 – Estrutura em malha de madeira curvada após processo de vaporização quente.	69
Figura 13 – Estrutura hiperboloide fabricada roboticamente por sistema de sulcagem.	69
Figura 14 – Pavilhão fabricado roboticamente em sistema estrutural de torção-ativa.	70
Figura 15 – Sistema de encaixe <i>finger-joint</i> roboticamente fabricado em placas de madeira.	71
Figura 16 – Pavilhão fabricado roboticamente em estrutura de placas de madeira encaixadas entre si por sistema <i>finger-joint</i> .	72
Figura 17 – Estratégia biomimética de projeto a partir da análise microscópica do esqueleto rígido da <i>Clypeasteroidea</i> , ou bolacha-da-praia.	72
Figura 18 – Análise microscópica do exoesqueleto de espécie de lagosta.	75
Figura 19 – Processo de fabricação robotizada para pavilhão com estrutura de fibras resinadas.	76
Figura 20 – A) <i>Elytron</i> de espécie de besouro; B) corte no <i>elytron</i> ; C) trabéculas microscópicas de ossatura.	77
Figura 21 – Pavilhão de pesquisa em estrutura de fibras resinadas, fabricado roboticamente.	78

Figura 22 – Processo de fabricação robótica do pavilhão de pesquisa em estrutura de fibras resinadas, utilizando molde inflável.	78
Figura 23 – Colaboração máquina-humano para construção de módulos <i>tensegrity</i>	79
Figura 24 – Braço robótico em processo de construção baseado em comportamento.	80
Figura 25 – Processo robotizado de costura de chapas finas de madeira para construção do pavilhão de pesquisa <i>ICD/ITKE 2015</i>	81
Figura 26 – À esquerda <i>IBA Timber Prototype House</i> , à direita <i>BUGA Wood Pavilion 2019</i>	82
Figura 27 – Pavilhão de pesquisa <i>ICD/ITKE 2016</i> , fabricado por dois braços robóticos e um drone.	82
Figura 28 – Modelo biológico do casulo da larva da traça <i>Lyonetia Clerkella</i> , à esquerda, e sua simulação robotizada, à direita.	83
Figura 29 – Processo de entrelaçamento da estrutura em fibras por braço robótico e drone.	83
Figura 30 – Roteiro de autoconstrução robotizada de estrutura <i>swarm</i> , em enxame.	84
Figura 31 – Experimento “ <i>Minibuilders</i> ” de fabricação robótica de estrutura em resina.	86
Figura 32 – Fabricação digital das colunas da Sagrada Família.	88
Figura 33 – Processo de fotogrametria para gerar nuvem de pontos 3D, da pedra angular do arco de entrada do Paço Episcopal do Porto, Portugal.	90
Figura 34 – Processo de fabricação robótica do protótipo em poliestireno expandido da pedra angular do arco de entrada do Paço Episcopal do Porto, Portugal.	91
Figura 35 – Comparação entre processo de fabricação robótica e processo de racionalização de trabalho manual por projeção de vídeo, para montagem de torre de blocos em <i>EPS</i>	92
Figura 36 – Exemplos de fabricação robótica aplicada à cortiça.	93
Figura 37 – Processo de criação e montagem robótica de torre de tijolos em <i>EPS</i> por estudantes de mestrado do <i>DFL FAUP</i>	94
Figura 38 – Processo de fabricação robótica do “ <i>CorkCrete Arch</i> ” do <i>DFL FAUP</i>	95
Figura 39 – Foto do Beijódromo, Lelé.	99
Figura 40 – Croquis do projeto do Beijódromo.	101
Figura 41 – Maquete palpável do projeto do Beijódromo.	101
Figura 42 – Modelo tridimensional renderizado do projeto do Beijódromo.	103
Figura 43 – Fotos da construção do Beijódromo.	104

Figura 44 – Perspectiva renderizada do modelo tridimensional do projeto da Catedral de Palmas – TO.	112
Figura 45 – Primeiros croquis para projeto da Catedral de Palmas – TO.	114
Figura 46 – Imagens iniciais do projeto da Catedral de Palmas – TO.....	114
Figura 47 – Fotos das obras: Feira de Milão, Parque Rhike e Palácio da ex-União Militar, da esquerda para direita.	116
Figura 48 – Amostragem de subdivisões criadas com o <i>LunchBox</i> ®.....	117
Figura 49 – Função do algoritmo genético por meio do componente <i>Galapagos</i> do <i>Grasshopper</i> ®.....	117
Figura 50 – Simulação gravitacional de superfície <i>NURBS</i> por meio do <i>Kangaroo</i> ®.	118
Figura 51 – Corte da treliça espacial projetada.	118
Figura 52 – Imagem renderizada do modelo tridimensional do projeto da Catedral de Palmas – TO.	119
Figura 53 – Protótipo em resina de poliuretano.....	120
Figura 54 – Protótipo em plástico <i>PLA</i>	120
Figura 55 – Sistema de encaixe projetado para conexão das barras que compoariam a treliça metálica.	121
Figura 56 – Escolha da seção com maior vão para detalhamento.....	122
Figura 57 – Definição <i>Grasshopper</i> ® para interseção entre barras e encaixes.	123
Figura 58 – Processo de planificação dos elementos de encaixe das barras metálicas.	124
Figura 59 – Protótipo em plástico <i>PLA</i> da parte da treliça metálica escolhida para detalhamento, em escala 1:25.	125
Figura 60 – Referências para o projeto “O Móvel”.	138
Figura 61 – Protótipos iniciais produzidos artesanalmente para “O Móvel”.	138
Figura 62 – Renderização do modelo tridimensional gerado pela primeira definição <i>Grasshopper</i> ® para “O Móvel”.	139
Figura 63 – Resumo da definição <i>Grasshopper</i> ® para “O Móvel”.....	140
Figura 64 – Renderização do modelo gerado pela definição <i>Grasshopper</i> ®.	141
Figura 65 – Processo automatizado de geração das pirâmides por <i>loops</i> de <i>feedback</i> utilizando o <i>add-on HoopSnake</i> ®.....	142
Figura 66 – Protótipo em plástico <i>PLA</i> de “O Móvel”.	143
Figura 67 – Processo de corte das barras de alumínio pelo fornecedor.	144

Figura 68 – Processo de perfuração das barras de alumínio, utilizando peça impressa em 3D para alinhar corretamente o limite da barra em relação à distância do furo.	144
Figura 69 – Mapa de montagem utilizado pela visualização na tela do computador.	145
Figura 70 – “O Móvel” montado em frente ao Teatro Dulcina de Moraes.	146
Figura 71 – “O Móvel” com injeção de gelo seco dentro do envelope artesanal de plástico filme e iluminação <i>LED</i>	147
Figura 72 – “O Móvel” sobre a marquise de entrada do Teatro Dulcina de Moraes com vídeo projeção mapeada.	148
Figura 73 – “O Móvel” suspenso na fachada do Centro Cultural Banco do Brasil – CCBB, em Brasília – DF.	149
Figura 74 – “O Móvel” suspenso na fachada do CCBB com vídeo projeção mapeada.	150
Figura 75 – Fechamento em papelão para evento em Brasília – DF.	151
Figura 76 – Referências de fechamentos em papel.	152
Figura 77 – Reforço estrutural com placas duplas de papelão.	152
Figura 78 – Primeira etapa da definição <i>Grasshopper</i> ®, parâmetro de altura dos fechamentos.	153
Figura 79 – Distribuição de ângulos para localização dos módulos de papelão.	153
Figura 80 – Escolha das alturas do fechamento a partir de superfície modelada ponto a ponto.	154
Figura 81 – Processo artesanal de fabricação dos módulos por faca de prensa. ...	155
Figura 82 – Corte a laser da logomarca do Coletivo <i>Voxel Lab</i> , em uma das placas.	155
Figura 83 – Arranjo floral aplicado ao fechamento e seu respectivo sistema de encaixe entre placas de papelão de três milímetros.	156
Figura 84 – <i>Parklet</i> multifuncional construído para evento na Casa de Cultura da América Latina, em Brasília – DF.	158
Figura 85 – Escultura do Memorial da América Latina, Oscar Niemeyer, São Paulo.	159
Figura 86 – Nuvem de pontos em matriz a partir das medidas do engradado que seria utilizado no <i>parklet</i>	159
Figura 87 – Simulação gravitacional de uma malha 3D em colisão com objetos previamente modelados ponto a ponto.	160
Figura 88 – Preenchimento do espaço residual da superfície com módulos de engradado.	161

Figura 89 – Mapa de montagem por cores para o processo de empilhamento de engradados.	162
Figura 90 – Imagens renderizadas do modelo 3D do <i>parklet</i> multifuncional.	163
Figura 91 – <i>ICD/ITKE Research Pavilion</i> 2010, Universidade de Stuttgart.	170
Figura 92 – Estudos iniciais para fechamento do espaço de trabalho do <i>DFL FAUP</i>	172
Figura 93 – Atualização da definição <i>Grasshopper®</i> do fechamento em papelão para o fechamento em <i>MDF</i>	172
Figura 94 – Resumo da definição <i>Grasshopper®</i> para fechamento em <i>MDF</i>	173
Figura 95 – Estudos de painéis com placas de <i>MDF</i>	174
Figura 96 – Continuação da modelagem algorítmica para projeto de fechamento em placas de <i>MDF</i>	175
Figura 97 – Superfície parametrizada para corte das extremidades das placas de <i>MDF</i>	175
Figura 98 – Ajuste do ângulo 45° para posicionamento das placas entre si.	176
Figura 99 – Planificação das linhas de corte de cada uma das placas.	176
Figura 100 – Perspectiva renderizada do modelo 3D do fechamento em <i>MDF</i> entrelaçado.	177
Figura 101 – Vista frontal renderizada do modelo 3D do fechamento em <i>MDF</i>	177
Figura 102 – Primeiro passo do modelo algorítmico de entrelaçamento, desenhar os perfis para criar as tiras entrelaçadas.	178
Figura 103 – Segundo passo do modelo algorítmico de entrelaçamento: desenhar curvas parametrizadas para criar as tiras entrelaçadas.	179
Figura 104 – Terceiro passo do modelo algorítmico de entrelaçamento: esquema da definição <i>Grasshopper®</i> para modelagem das tiras entrelaçadas.	179
Figura 105 – Processo de modelagem algorítmica das tiras e suas conexões.	180
Figura 106 – Elementos prismáticos para corte dos encaixes entre as tiras, parametrizados com ângulo de rotação dado pela tangente nos pontos de interseção.	181
Figura 107 – Modelagem algorítmica dos encaixes entre as tiras.	181
Figura 108 – Último passo do modelo algorítmico de entrelaçamento: planificar as tiras para posterior fabricação digital.	182
Figura 109 – Foto do primeiro protótipo feito em <i>plotter</i> de recorte de papel, em escala 1:25.	183
Figura 110 – Foto do segundo protótipo feito por impressão 3D de plástico <i>PLA</i>	183
Figura 111 – <i>Quonset Hut</i> , <i>Instant House</i> e <i>WikiHouse</i>	193
Figura 112 – <i>Maison Dom-Ino</i> de Le Corbusier.	194

Figura 113 – Habitação Villa Verde 2010.....	195
Figura 114 – Croquis iniciais da estrutura em micro concreto.	196
Figura 115 – Croqui da estrutura em aço.....	196
Figura 116 – Planta baixa da casa compartilhada, com esquema ilustrativo de ocupação.....	197
Figura 117 – Modelo preliminar <i>Rhinoceros</i> ® da estrutura em micro concreto.....	198
Figura 118 – Modelo preliminar <i>Rhinoceros</i> ® da estrutura em aço.	199
Figura 119 – Renderização ilustrativa da casa compartilhada.	199
Figura 120 – Resumo da definição <i>Grasshopper</i> ® para estrutura em aço.	200
Figura 121 – Primeiro passo da modelagem algorítmica: escolha de um ponto de inserção.....	202
Figura 122 – Segundo passo da modelagem algorítmica: criação de uma matriz de pontos.	202
Figura 123 – Escolha de pontos a partir da matriz anterior.	203
Figura 124 – Movimentação dos pontos anteriores para base dos pilares.	204
Figura 125 – Conformação das linhas que gerarão as vigas posteriormente no algoritmo.....	205
Figura 126 – Conformação das linhas que gerarão as vigas em balanço.....	205
Figura 127 – Conformação do Voronoi.	207
Figura 128 – Cálculo básico para seção dos pilares.	208
Figura 129 – Criação das linhas dos pilares de acordo com fator de correção.	209
Figura 130 – Criação das linhas das vigas de acordo com cálculo empírico.	210
Figura 131 – Esquema das peças estruturais modeladas algoritmicamente.	211
Figura 132 – Esquema das peças com vigas e arcos.....	212
Figura 133 – Esquema geral de montagem das peças estruturais sobre modelo preliminar de fundação.	213
Figura 134 – Detalhe de esquema de montagem por encaixes parafusados entre as peças da estrutura metálica.	213
Figura 135 – Modelagem das primeiras superfícies dos pilares.....	214
Figura 136 – Modelagem dos pilares com vigas em balanço.....	215
Figura 137 – Modelagem dos pilares que recebem vigas.	215
Figura 138 – Modelagem dos encaixes, a partir de <i>cluster</i> dentro do <i>Grasshopper</i> ®.	216
Figura 139 – Modelagem dos pilares em arco.	217

Figura 140 – Transformação recursiva de todos as seções de pilares e vigas a partir da alteração dos parâmetros de distância entre os eixos estruturais.....	218
Figura 141 – Ordenamento das peças modeladas algoritmicamente.	219
Figura 142 – Cálculo do peso do material a ser utilizado.....	220
Figura 143 – Planificação das peças estruturais.	220
Figura 144 – Processo de <i>nesting</i> das peças estruturais para corte CNC.	221
Figura 145 – Plano de corte corrigido conforme espessuras das peças para base da maquete palpável.....	224
Figura 146 – Peças estruturais planificadas para corte CNC a laser para maquete palpável.....	225
Figura 147 – Montagem da maquete palpável.	226
Figura 148 – Processo de montagem da maquete palpável.	227
Figura 149 – Encaixes milimétricos.....	228
Figura 150 – Maquete palpável da estrutura da casa compartilhada.....	228
Figura 151 – Renderização ilustrativa do modelo final de casa compartilhada.	229

LISTA DE SIGLAS

AAG	Grupo de Arquitetura Avançada
ABS	Plástico Acrilonitrila Butadieno Estireno
AEC	Arquitetura, Engenharia, Construção
BA	Bahia
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BRG	<i>Block Research Group</i>
B-rep	<i>Boundary representation</i>
CAAD	<i>Computer-Aided Architectural Design</i>
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>
CAEDM	<i>Computer-Aided Engineering, Design and Manufacturing</i>
CAL	Casa de Cultura da América Latina
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CCBB	Centro Cultural Banco do Brasil
CEAU	Centro de Estudos de Arquitetura e Urbanismo
CNC	Controle Numérico por Computador
CTRS	Centros Tecnológicos da Rede Sarah
DEA	Decanato de Esportes e Arte
DEX	Decanato de Extensão
DF	Distrito Federal
DFL	<i>Digital Fabrication Laboratory</i>
DIGI-Fab	Laboratório de Fabricação Digital
eCAADe	<i>Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe</i>
EPS	Poliestireno Expandido
ETFE	Plástico Etileno Tetrafluoroetileno
ETH	Instituto Federal de Tecnologia
EUA	Estados Unidos da América
FabLab	<i>Fabrication Laboratory</i>
FAUP	Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto
FAUUSP	Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

FCT	Fundação de Ciência e Tecnologia
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FRAC	<i>Fonds Régional d'Art Contemporain de la Région Centre</i>
GRC	<i>Glass-fibre reinforced concrete</i>
IAAC	Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha
IBTH	Instituto Brasileiro da Tecnologia do Habitat
ICD	<i>Institute for Computational Design</i>
INESC TEC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência
ISCTE-IUL	Instituto Universitário de Lisboa
IST-UTL	Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa
ITKE	<i>Institute of Building Structures and Structural Design da Universidade de Stuttgart</i>
JIRA	<i>Japanese Industrial Robot Association</i>
KRL	<i>KUKA Robot Language</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LFDC	<i>Laboratório de Fabricação Digital e Customização em Massa</i>
LUBFS	<i>Center for Land Use and Built Form Studies</i>
MDF	<i>Medium-Density Fiberboard</i>
MEL	<i>Maya Embedded Language</i>
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachusetts
NURBS	<i>Non-Uniform Rational B-Spline</i>
PLA	Plástico Ácido Poliláctico
PPCUB	Plano de Preservação do Conjunto Urbanístico de Brasília
PPG/FAU/UnB	<i>Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília</i>
RMIT	<i>Royal Melbourne Institute of Technology</i>
SAM	<i>Semi-Automated Mason</i>
SCS	Setor Comercial do Sul
SDS	Setor de Diversões Sul
SIA	Setor de Indústrias e Abastecimento
SIGraDi	Sociedade Ibero-Americana de Gráfica Digital

TO	Tocantis
UNESCO	<i>Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura</i>
UnB	Universidade de Brasília
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	24
Contextualização.....	25
Problemática	27
Relevância da problemática.....	28
Hipótese.....	29
Indicativo da hipótese: integração de sistemas de projeto.....	30
Objetivos	30
Procedimentos metodológicos	32
A integração da fabricação digital e da <i>Computer-Aided Engineering – CAE</i> ao projeto arquitetônico	34
Programa da casa compartilhada	35
Organização do trabalho.....	36
Pertinência	38
Resultado principal esperado.....	39
CAPÍTULO 1	40
1.1 – Definição de Produção Digital e conceitos utilizados na tese	41
1.1.1 – Projeto digital: <i>CAD, CAAD, BIM, CAE</i>	42
1.1.1.1 – Parametrização em arquitetura	44
1.1.1.2 – Técnica de parametrização aplicada à arquitetura	47
1.1.2 – Fabricação digital: sistematização da tecnologia no processo construtivo	51
1.1.2.1 – Aplicações da robótica na arquitetura: breve panorama histórico na civilização ocidental.....	53
1.1.2.1.1 – Primeiro contato com a robótica em arquitetura.....	55
1.1.2.1.2 – Aplicações da robótica em arquitetura na primeira década do século XXI europeu.....	58
1.1.2.1.3 – Aplicações da robótica em arquitetura na segunda década do século XXI europeu.....	68
1.1.2.1.3.1 – O papel da Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto – FAUP na pesquisa acadêmica sobre aplicação da robótica em arquitetura.....	88
1.1.2.1.3.2 – Fabricação robótica em arquitetura: outros estudos e o contexto brasileiro.....	97
1.1.2.2 – O Beijódromo e a fabricação digital em Brasília	99
1.1.2.2.1 – Concepção e projeto do Beijódromo	100

1.1.2.2.2 – Racionalismo de Lelé para o processo construtivo	103
1.1.2.2.3 – Vicente Muñoz sobre o projeto e construção do Beijódromo ...	106
1.1.2.2.4 – A precursão de Lelé na fabricação digital no Brasil.....	107
1.1.2.2.5 – Considerações sobre o estudo do Beijódromo	108
CAPÍTULO 2	110
2.1 – Primeiro experimento: produção digital da Catedral de Palmas.....	111
2.1.1 – O traço do arquiteto e a parametrização.....	112
2.1.2 – Primeira fase do estudo de detalhamento	115
2.1.3 – Segunda fase do estudo de detalhamento	121
2.1.4 – Resultados da aplicação da produção digital na Catedral de Palmas ..	124
2.1.5 – Problemática da aplicação da produção digital no projeto arquitetônico	126
2.1.6 – O papel da produção digital na prática de arquitetura	128
CAPÍTULO 3	131
3.1 – Segundo experimento: produção digital de estruturas leves.....	132
3.1.1 – Contexto da investigação.....	132
3.1.1.1 – O coletivo.....	133
3.1.2 – Procedimentos metodológicos	133
3.1.2.1 – Trabalho no campo artístico	135
3.1.3 – Primeira estrutura leve: O Móvel.....	137
3.1.4 – Segunda estrutura leve: fechamento em papelão para espaço <i>DJ</i>	150
3.1.5 – Terceira estrutura leve: <i>parklet</i> multifuncional	157
3.1.6 – Trabalho artístico e produção digital	163
3.1.7 – Considerações sobre a produção digital qualificada pelo contexto específico.....	165
CAPÍTULO 4	168
4.1 – Estágio de doutorado no <i>Digital Fabrication Laboratory – DFL</i> da Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto – FAUP.....	169
4.1.1 – Estudos de produção digital para processamento de <i>MDF</i>	170
4.1.1.1 – Visita ao ISCTE-IUL Instituto Universitário de Lisboa.....	184
4.1.1.2 – Visita à Universidade de Coimbra	185
4.1.2 – Perspectiva luso-brasileira sobre produção digital.....	185
4.1.3 – Considerações sobre a viabilidade da fabricação robótica	189
CAPÍTULO 5	191
5.1 – Terceiro experimento: roteiro de produção digital de casa compartilhada por meio de processo <i>CAEDM</i>	192

5.1.1 – A estrutura como partido arquitetônico	193
5.1.2 – Modelos tridimensionais iniciais.....	198
5.1.3 – Modelo algorítmico.....	200
5.1.3.1 – Primeira etapa da definição: modelagem das geometrias básicas.....	201
5.1.3.2 – Segunda etapa da definição: introdução do cálculo estrutural na modelagem algorítmica	206
5.1.3.3 – Terceira etapa da definição: modelagem dos componentes da estrutura metálica	210
5.1.3.4 – Quarta etapa da definição: processamento para fabricação digital	218
5.1.3.5 – Síntese do roteiro de produção digital da casa compartilhada	222
5.1.4 – Maquete palpável: visualização dos componentes estruturais e estudo de montagem.....	223
5.1.5 – Roteirização como método para projeto arquitetônico.....	229
5.1.6 – Considerações sobre o método de roteirização do projeto arquitetônico	235
CONCLUSÃO.....	237
Considerações finais.....	238
Contribuições da tese	241
Sobre a parametrização.....	241
Trabalho de investigação experimental e laboratorial.....	242
Panorama da teoria e história da robótica em arquitetura	243
Precursão de Lelé no campo da fabricação digital no contexto brasileiro	243
Aplicação da parametrização ao projeto arquitetônico	244
Produção digital de estruturas leves em contextos econômicos desfavorecidos	245
Aplicação da fabricação robótica em arquitetura	246
Método de roteirização do projeto arquitetônico	247
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	250
ANEXOS	261
Entrevista com Vicente Muñoz.....	262
Autorização para publicação da entrevista	279

INTRODUÇÃO

Contextualização

A convergência de tecnologias, a organização fabril integrada digitalmente e a crença de que se aproxima, com isso, de uma mudança da organização do trabalho, são fenômenos que estão surgindo no contexto mundial. A recente quarta revolução industrial, conceituada por Klaus Schwab (2017), compreende uma nova agenda produtiva para que a indústria possa se tornar mais sustentável, racional, otimizada, diante de um panorama socioeconômico em transformação.

A quarta revolução industrial [...] não é apenas sobre sistemas e máquinas inteligentes e conectadas. Seu escopo é mais abrangente. Ocorrendo simultaneamente ondas de futuras inovações em áreas desde sequenciamento genético até nanotecnologia, desde energia renovável até computação quântica. É a fusão dessas tecnologias e suas interações através dos domínios físico, digital e biológico que tornam a quarta revolução industrial fundamentalmente diferente das revoluções anteriores¹ (SCHWAB, 2017, p. 8, tradução nossa).

Nesse sentido, a princípio, todas as disciplinas que se relacionam com a indústria necessitam adaptar seus métodos, inclusive a arquitetura. Mario Carpo (2011) apresenta um contexto histórico que ajuda a compreensão do que a indústria 4.0 ainda viria a representar para a arquitetura atual. Desde Leon Battista Alberti (1404-1472), o arquiteto se afastou da construção, afirmando sua autoria por meio do desenho e da representação daquilo que seria construído. Com a fabricação digital, o arquiteto volta a se aproximar da construção, ou seja, àquilo que foi o seu ofício antes de Alberti, no sentido de uma produção não estandardizada de objetos semelhantes entre si ao invés da reprodução seriada de cópias. Tal autor afirma que:

Algoritmos, *software*, *hardware*, e ferramentas de fabricação digital são os novos standards que determinam não apenas o aspecto geral de todos os objetos em uma série não standard, mas também os aspectos de cada produto individual, que pode se alterar randomicamente ou por projeto. Diferentemente de uma impressão mecânica, que fisicamente estampa a mesma forma nos objetos, uma impressão algorítmica torna exteriores e

¹ Original: “*The fourth industrial revolution, however, is not only about smart and connected machines and systems. Its scope is much wider. Occurring simultaneously are waves of further breakthroughs in areas ranging from gene sequencing to nanotechnology, from renewables to quantum computing. It is the fusion of these technologies and their interaction across the physical, digital and biological domains that make the fourth industrial revolution fundamentally different from previous revolutions.*” (SCHWAB, 2017, p. 8).

visíveis formas que se alteram e se transformam de um objeto para o outro² (CARPO, 2011, p. 99, tradução nossa).

A fabricação digital é parte da agenda contemporânea da arquitetura, uma multidisciplinaridade necessária na medida em que se descortinam tais novos fenômenos. Essa tecnologia aproxima a arquitetura do processo construtivo, alargando o seu escopo de projeto para além de sua documentação técnica e detalhamento de execução da obra, em direção, por exemplo, à programação de maquinários capazes de operar funções de construção.

Em 2003, Branko Kolarevic (2003) racionalizou uma produção digital em arquitetura, demonstrando como a fabricação controlada numericamente por computador – CNC já é algo explorado e utilizado na área, ao reunir trabalhos de Frank Gehry, Norman Foster, entre outros arquitetos.

A teoria da *autopoiesis* da arquitetura, publicada em 2011 por Patrik Schumacher (2011), justifica uma prática onde ocorre a criação própria da arquitetura, onde ela se referenciaria por si própria, independente de outras linguagens, e criaria os próprios meios de construção ao utilizar a técnica da parametrização para controle da fabricação digital. No mesmo ano de 2011, Mark Burry (2011) contrapôs tal teoria, ao inseri-la na realidade socioeconômica da maior parte da população mundial que não tem acesso aos maquinários que a possibilitariam na prática. O autor traz o conceito de *scripting cultures* que, em uma tradução ampla, significa culturas digitais ou, mais especificamente, culturas de programação, roteirização. A ideia é de que é uma ação que deve ocorrer de baixo para cima, pela assimilação cultural para que depois possa, de fato, mudar o ciclo econômico e produtivo.

Em 2015, José Pedro Sousa (2015) confirmou esta orientação com uma extensa produção de aplicação de inovação para a construção civil no contexto português. O que possibilitou vislumbrar como fazer essa aplicação em contextos menos favorecidos economicamente ou tecnologicamente, ao se orientar os esforços para condicionantes sociais que devem necessariamente ser consideradas dentro de uma escala de produção cotidiana.

² Original: “Algorithms, software, hardware and digital manufacturing tools are the new standards that determine not only the general aspect of all objects in a nonstandard series, but also the aspects of each individual product, which may change randomly or by design. Unlike a mechanical imprint, which physically stamps the same form onto objects, an algorithmic imprint lets outward and visible forms change and morph from one object to the next.” (CARPO, 2011, p. 99).

O que os laboratórios internacionais de investigação estão procurando são maneiras de automatizar a prática da arquitetura, tanto do ponto de vista de projeto quanto de construção, em maior ou menor grau, a depender das tecnologias disponíveis. Ao incluírem tal conhecimento nas faculdades, indicam um alargamento disciplinar, uma vez que abre a oportunidade de o arquiteto programar os maquinários e introduzir diretamente conhecimento da engenharia, entre outras áreas, para além de desenhar, modelar, documentar e detalhar a execução da obra.

É dentro desse contexto que se insere a temática desta tese, ao observar as mudanças tecnológicas que a arquitetura vem assumindo em países mais desenvolvidos industrialmente. Compreende-se que há um senso comum entre economistas e historiadores de que o processo de industrialização ocorre atrasado no Brasil, devido, principalmente, à característica da colonização que sedimentou, durante muito tempo na cultura do país, o predomínio produtivo dos grandes proprietários de terra e de exportação de matéria-prima. O que ocasionou uma verdadeira defasagem do sistema fabril brasileiro e uma má articulação da sociedade, devido a fatores econômicos.³

Mesmo diante de tal contexto, é possível verificar um princípio de emancipação pelo o uso das tecnologias digitais, onde elas possam apresentar alternativas frente ao sistema padronizado predominante. A fabricação digital é um potencial transformador do sistema construtivo estandardizado, mas para utilizá-la com eficiência no campo da arquitetura são necessários métodos avançados de projeto, como a técnica da parametrização que ainda não é comum para a maior parte dos currículos acadêmicos e práticas profissionais na atualidade brasileira.

Problemática

A questão teórica que se levanta é como fazer a integração da tecnologia à arquitetura em um currículo acadêmico existente. Pressupõe-se a integração da tecnologia em todas as instâncias disciplinares de maneira transversal, teoria e história, projeto, cálculo e programação, sistemas construtivos, técnicas de computação gráfica. É um desafio disciplinar criar uma cultura de aplicação da tecnologia, ao incorporar a fabricação digital à arquitetura, tendo em vista que ela

³ Sobre a problemática do desenvolvimento industrial tardio no Brasil, já foi desenvolvida pesquisa na dissertação de mestrado (LACROIX, 2013).

possibilita meios alternativos de construção civil, além dos estandardizados, tanto para etapas de projeto quanto para construção.

O problema prático que se levanta é o de reconhecimento das etapas da produção industrial para execução de uma obra, ao se considerar a variedade de materiais que podem ser produzidos digitalmente, uma vez que a fabricação digital opera com base no processamento direto do material escolhido. Relaciona-se a uma questão de adaptação aos meios produtivos avançados que exige educação em diversos níveis, desde os projetistas até os fornecedores, ao se compreender a dificuldade de implantação de um sistema fabril capaz de atender métodos digitais de projeto e construção.

No caso específico do Distrito Federal, Neander Furtado Silva [et al.] (2009) confirmaram, há mais de uma década, a existência de um contingente substancial de fábricas que utilizam tecnologias de fabricação CNC. Um contingente que deve ter apenas aumentado desde então. No entanto, persiste o problema de posicionamento da arquitetura diante da produção industrial, mesmo que no contexto haja exemplo de referência, o Memorial Darcy Ribeiro, também conhecido como Beijódromo, de João Filgueiras Lima, Lelé. Tal obra ainda parece não ter sido totalmente compreendida e permanece no bastião da arquitetura moderna brasileira, como obra de natureza singular, feita por recursos tecnológicos que poucos arquitetos exploram.

De maneira ampla, tal problemática não pode ser encarada somente de uma perspectiva técnica/tecnológica, porque depende de uma organização social/produtiva que consiga trabalhar com as tecnologias. De maneira mais específica, neste trabalho, a problemática foi observada a partir de dados produtivos reais, junto aos produtores e fornecedores, e durante o próprio processo construtivo.

Em síntese, considera-se um problema espacial, de como produzir o espaço utilizando tecnologias avançadas de construção, em um determinado contexto. Consequentemente, é um problema de projeto de arquitetura, que precisa saber o quê e como projetar, de forma a atender adequadamente novas organizações espaciais.

Relevância da problemática

Em um cenário de mudança do sistema produtivo de uma sociedade, assim como o proposto pela indústria 4.0, em direção a meios avançados de utilização das tecnologias avançadas, é imprescindível que projetistas e fabricantes estejam

alinhados em suas ações. A problemática que existe na relação entre arquitetura e indústria não se refere apenas a uma questão de estilo das construções, mas também é referente à prática de profissionais da construção civil que se veem cada vez mais confrontados com a necessidade de pensar habitações flexíveis do ponto de vista econômico e, ao mesmo tempo, em termos de soluções espaciais.

A questão do projeto parametrizado vai além da manipulação de *softwares*, uma vez que trata, também, da automação do processo de construção dos espaços projetados (GRAMAZIO; KOHLER, 2008; MENGES, 2011; SOUSA, 2015). A automação entendida como um sistema de controle de maquinários, dispositivos ou processos produtivos, que pode contar com maior ou menor nível tecnológico a depender do contexto. O campo de atuação do arquiteto é ampliado devido à disseminação de métodos e teorias capazes de sistematizar a organização do trabalho. Portanto, em se tratando de um contexto profissional formativo, é necessário estabelecer bases de trabalho que se apropriem desse campo estendido de atuação e isso requer conhecimento sobre como lidar eficientemente com meios produtivos avançados.

Hipótese

Desde a década de 1960, há uma teoria emergente de aplicação de programação computacional e matemática em arquitetura, que conduz ao raciocínio de roteirização, ou *scripting*, do projeto e da construção, a ser definida no próximo capítulo. Além disso, os *softwares* e *hardwares* estão cada vez mais acessíveis, sugerindo que, por meio deles, pode se viabilizar sistemas digitais de produção.

Nesse sentido, parece viável incluir uma roteirização produtiva, tendo em vista as tecnologias digitais, como resposta à problemática de integração teórica e prática da fabricação digital à arquitetura. Acredita-se que a ação de roteirizar a produção digital é uma resposta ao problema da automação da construção civil, pautando-se em *softwares* que permitam isso. A roteirização pode ser um meio de aplicar essa tecnologia em arquitetura, porque ela otimiza o trabalho do arquiteto e racionaliza o processo construtivo, concedendo tempo de dedicação aos reais problemas arquitetônicos e maior segurança e rapidez no canteiro de obras.

No caso desta tese, adotou-se o *software Rhinoceros®* e seu *plug-in Grasshopper®*, tendo em vista que os principais estudos referenciados, atualmente,

já o utilizam, sobretudo, porque é o mais completo em termos de sua compatibilização no âmbito industrial. Evidentemente, outros *softwares* também possibilitam a parametrização, tais como *Blender* e seu *plug-in Sverchok*, *Revit®* e seu *plug-in Dynamo®* e *Cinema4D®* e seu *plug-in Xpresso®*, desconsiderando-se *softwares* mais caros para uso em escala industrial, tais como *CATIA®* ou *Generative Components®*.

Indicativo da hipótese: integração de sistemas de projeto

A partir da ação de roteirizar a produção digital como meio de racionalização do projeto e processo construtivo arquitetônico, percebe-se um movimento de integração de sistemas dentro de etapas de trabalho, não uma integração total, ou totalizante, mas resultante de organizações singulares que ocorrem com o tempo e requerem modelos produtivos específicos. Exemplos: um conjunto de projeto que inclua opções de análise climática em relação às transformações geométricas de um elemento protetor de uma fachada; ou um conjunto de projeto dedicado às transformações geométricas de uma viga de concreto armado recebendo cargas de uma laje. Ocorre, também, uma integração dentro dos *softwares*, que cada vez mais automatizam as operações paramétricas, transformando processos de programação longos em cada vez mais funções interativas. Então, é uma tendência do avanço dos *softwares* que procuram atender com dinamismo as necessidades do projetista⁴.

Nesta tese, propõe-se a integração da fabricação digital e de processos de engenharia como parâmetros do projeto de arquitetura, ao utilizar um processo de roteirização da produção. O que pode posicionar o arquiteto como um profissional detentor de um protocolo produtivo que o possibilita garantir a sustentabilidade de um espaço com longa vida útil. Com isso, acredita-se na possibilidade de haver uma qualificação do profissional em direção à integração da prática com um aparato produtivo capaz de suprir as necessidades múltiplas e interdisciplinares do arquiteto inserido no contexto onde se tenha acesso à fabricação digital.

Objetivos

O objetivo principal da tese é verificar e demonstrar a aplicação de produção digital em arquitetura por meio de experimentos de roteirização do projeto

⁴ Sobre o tema da tendência de integração dos *softwares* para melhor atendimento das técnicas de projeto de arquitetura, ver artigo científico de Lilian Silva [et al.] (2019).

arquitetônico, com o intuito de responder ao problema de construção civil controlada por computador.

São muitos os parâmetros que podem ser considerados em um projeto de arquitetura, compreendendo-se a complexidade que vem ganhando na prática contemporânea, cada vez mais legislada e normatizada. A parametrização viabiliza, portanto, a conjugação de diversos fatores em um roteiro de produção. Nesse sentido, a parametrização é central neste trabalho, uma vez que é por meio de sua lógica que será possível, por exemplo, projetar os movimentos de execução do maquinário, ou integrar o cálculo estrutural ao detalhamento arquitetônico.

Diante do objetivo principal de demonstração da produção digital em arquitetura, os objetivos específicos tornaram-se necessários para a sistematização das diversas etapas da pesquisa que constituiu esta tese, são eles:

- Criar um modelo parametrizado para investigar se os resultados corroborariam a possibilidade de roteirizar digitalmente a arquitetura, a partir do contexto específico onde supostamente seria produzida. O intuito de se fazer o modelo foi identificar a possibilidade de tornar tal técnica mais acessível, em relação à problemática de integração na disciplina.

- Aprofundar o conhecimento de parametrização possibilitou observar como ele se desvenda para a profissão de arquitetura. A intenção foi demonstrar ao profissional, ou ao estudante de arquitetura, como utilizar recursos que automatizam processos de projeto, tendo em vista um determinado contexto;

- Incluir uma metodologia experimental no sentido de se aproximar as verificações dos contextos práticos e as etapas da produção digital, para cada um dos experimentos realizados;

- Identificar as questões de racionalização construtiva no contexto da produção industrial brasileira, pelo exemplo do trabalho do arquiteto Lelé no estudo de caso sobre o Beijódromo;

- Verificar os limites de aplicação do projeto paramétrico em arquitetura e da possibilidade de máxima automação nas práticas de montagem e execução de estruturas leves;

- Testar em laboratório a aplicação da fabricação robótica em arquitetura;

- Criar um modelo de roteiro para abarcar as complexidades do projeto paramétrico para fabricação digital, ao se considerar um determinado contexto tecnológico.

Procedimentos metodológicos

Paralelamente a uma série de leituras críticas sobre os principais problemas e atividades de pesquisa teórica, realizou-se uma sequência de experimentos para testar suas considerações na prática. Esclarecer-se sobre os conceitos e, sequencialmente, aplicá-los na realidade para verificar a viabilidade de sua transposição, foi uma ação repetida deliberadamente nos projetos de arquitetura aqui apresentados. Percebeu-se que, a partir de uma tal ação, foram suscitadas as principais críticas que este trabalho propõe. A principal delas é a baixa viabilidade da fabricação digital no Brasil, sobretudo por fatores econômicos e diferenças industriais inerentes de um contexto produtivo específico, quando comparado a países mais desenvolvidos industrialmente, conforme se observou no segundo experimento aqui realizado, de aplicação da produção digital em estruturas leves.

Primeiramente, houve uma revisão de literatura (NEGROPONTE, 1970; TEICHOLZ, 1985; KOLAREVIC, 2003; SOUSA, 2015) que reuniu o estado da arte em relação à fabricação digital e, desta forma, conduziu tanto à prática posterior quanto à formulação dos conceitos do trabalho. Diante do processo teórico foi realizada uma pesquisa específica sobre o trabalho de Lelé que demandou entrevistas, contatos com pessoas envolvidas na obra analisada e visitas à fábrica que realizou o processamento da estrutura metálica da obra. No entanto, o único registro apresentado foi a entrevista com Vicente Muñoz. Outras informações adquiridas foram incorporadas aos modelos algorítmicos enquanto parâmetros dos projetos, como dimensões e características dos materiais, e funcionamento dos maquinários.

Depois, foram realizados dois experimentos. O primeiro na escala do edifício de maior porte, a partir de uma colaboração com o arquiteto Paulo Henrique Paranhos que compartilhou o projeto da Catedral de Palmas – TO de sua autoria. O segundo na escala do elemento estrutural, ao se realizar três estruturas leves em conjunto com o Coletivo *Voxel Lab*, com a finalidade de cenografia para diferentes eventos produzidos em Brasília – DF. Para ambos os experimentos, partiu-se de um método, que se ajustou ao longo de cada um dos processos, de utilização do projeto paramétrico e da

fabricação digital para se automatizar etapas produtivas. O intuito foi evitar tanto o trabalho exaustivo de modelagem tridimensional, quanto o trabalho artesanal de construção, de forma a racionalizá-los em todas as etapas e por meio de todas as ferramentas possíveis, sejam elas mecânicas ou eletrônicas, controladas ou não por computador. Um método de sistematização digital do trabalho arquitetônico que procurou o máximo de automação para a produção dos experimentos, mesmo que isso não tenha sido alcançado a ponto de substituir por completo o trabalho artesanal. Nesse sentido, percebeu-se a oportunidade de utilização de recursos da robótica, ao se partir do preceito de que o braço robótico poderia operar um trabalho mais preciso, em realidade, mais próximo do próprio trabalho artesanal, em comparação a máquinas CNC mais simples, e procurou se aprofundar estudos sobre tal tema.

Os estudos sobre fabricação robótica conduziram para a tentativa de incorporá-la ao roteiro. Nesse sentido foi realizado um estágio de doutorado no *Digital Fabrication Laboratory – DFL* da Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto – FAUP, em Portugal. Mesmo que não tenha sido possível incorporar a robótica ao roteiro aqui proposto, devido às condições produtivas do próprio contexto, tal etapa da pesquisa revelou aspectos decisivos sobre as especificidades de programação do braço robótico e, além disso, possibilitou delimitar o roteiro de produção digital da casa compartilhada.

Os experimentos⁵ foram importantes para sistematizar um roteiro completo a ser detalhado, em relação a parâmetros delimitados neste trabalho. A partir daí, ocorreu uma sistematização de análise e organização do último modelo algorítmico aqui exposto, com a intenção de alcançar uma melhor didática de apresentação de seus dados. Seguiu-se o mesmo método experimental adotado nos experimentos predecessores, para a formulação do roteiro de produção digital para projeto e fabricação na escala arquitetônica da habitação. Em termos técnicos, o roteiro se constituiu em um sistema generativo que alcançou a *Building Information Modeling – BIM*, personalizado por um processo *Computer-Aided Engineering, Design, Manufacturing – CAEDM*, modelado algorítmicamente no *Grasshopper®*.

⁵ Para os experimentos da Catedral de Palmas e das estruturas leves foram desenvolvidos dois artigos científicos, respectivamente, como modo de estabelecer uma resposta científica para cada um deles (LACROIX [et al.], 2016; LACROIX, 2018).

A integração da fabricação digital e da *Computer-Aided Engineering* – CAE ao projeto arquitetônico

A robótica vem sendo utilizada na construção civil e são diversos os casos no contexto internacional. Serve para corte de barras metálicas; para fresagem de blocos de pedra; para entalhe de madeira; para entrelaçar material em fibra; para colaborar em conjunto com o operário. Desde exemplos reconhecidos de maior porte como as complementações mais recentes da Basílica da Sagrada Família, em Barcelona, detalhadas por Burry (2011), até exemplos mais experimentais como a produção da prática arquitetônica *New-Territories*.

Apesar de uma breve abordagem histórica sobre a temática da computação e robótica aplicadas em arquitetura, desde a década de 1960, concentrada nos Estados Unidos da América – EUA, aprofundou-se na análise sobre casos ocorridos nas duas décadas do século XXI, dentro do campo da investigação acadêmica, com especial foco em instituições europeias. Tal análise revelou a importância da Universidade do Porto, que conta com laboratório experimental onde a robótica é aplicada para a aprendizagem de automação na formação acadêmica em arquitetura (SOUSA; XAVIER, 2015). O *DFL FAUP* aborda o uso da robótica inserida no seu próprio contexto de construção civil. Tal abordagem influenciou a pesquisa que se apresenta aqui, ao considerar o uso da tecnologia em relação à situação econômica dada. Mesmo assim, uma tal abordagem se comprovou inviável para efeitos da elaboração do roteiro que constitui esta tese. Portanto, para o modelo da casa compartilhada, assumiu-se uma tecnologia CNC à plasma, para corte de aço, com três eixos de movimentação, de acordo com a disponibilidade do fornecedor do Distrito Federal, considerando-se o mesmo que forneceu a tecnologia para a obra do Beijódromo, de Lelé.

Tal comprovação delimitou o escopo do roteiro de produção digital no processo de projeto aqui apresentado, tornando-o, evidentemente, mais simples, ao se comparar com a complexidade envolvida na programação de um braço robótico. Mesmo assim, configurou-se em um modelo algorítmico complexo, que encadeia desde etapas de simulação tridimensional até etapas de fabricação digital, considerando um contexto produtivo específico.

Uma vez que se projeta um sistema construtivo a ser fabricado digitalmente, é obrigatória uma solução garantida do ponto de vista de sua resistência estrutural.

Nesse sentido, foi necessária a inclusão de uma etapa de *Computer-Aided Engineering – CAE* no roteiro, de tal forma que as peças a serem fabricadas fossem projetadas para deter as propriedades corretas quanto à sua engenharia. Portanto, um cálculo estrutural simples foi inserido, fundamentado em Yopanan Conrado Pereira Rebello (2007) e Luís Andrade de Mattos Dias (1997), ao se considerar uma estrutura metálica composta por pilares e vigas a serem parafusados entre si por sistema de encaixe. Uma solução que foi pensada tendo em vista uma racionalização do trabalho artesanal na obra.

Todos os experimentos realizados na Universidade de Stuttgart, a serem analisados no próximo capítulo, consideraram a integração da engenharia nos processos de execução, o que fundamentou as práticas desenvolvidas. Já em 2005, José Pedro Sousa e José Pinto Duarte (SOUSA; DUARTE, 2005) apontaram a oportunidade de utilização do processo *CAE*, ao integrá-lo ao projeto arquitetônico. A constituição de um roteiro de produção digital só tem validade se incorporar em seu processo a garantia que a engenharia pode oferecer em termos de viabilidade material, durabilidade física e estabilidade; e isso se torna acessível ao profissional por meio da parametrização do projeto arquitetônico.

Neste trabalho de tese, a aplicação do processo *CAE* ocorreu tanto no projeto da cobertura da Catedral de Palmas – TO, quanto no projeto da estrutura da casa compartilhada, ambos projetos arquitetônicos pensados por meio de estruturas metálicas.

Programa da casa compartilhada

A casa compartilhada foi exemplo de roteirização do último experimento abordado nesta tese. Foi concebida a partir de uma série de reflexões e desenhos, croquis iniciais, que evoluíram ao considerarem questões como escolha de materiais, métodos de fabricação digital e dimensão do programa de necessidades ambientais. Uma vez que o roteiro pretendeu parametrizar um processo *CAEDM*, projetou-se apenas o sistema estrutural, para que, desta forma, se possibilitasse a livre ocupação por parte dos seus habitantes.

Mesmo que o enfoque deste último experimento tenha sido a concepção da estrutura que permitisse a ocupação habitável de diferentes maneiras, considerou-se necessário delimitar um programa funcional de pequeno porte e que representasse

um desafio comum na prática para se constituir em objeto do roteiro, uma vez que se pretendia um escopo elementar e essencial de projeto de arquitetura. A ideia foi de uma estrutura mínima que pudesse, ao mesmo tempo, apoiar uma laje de cobertura e possibilitar uma variedade de ocupações feitas independentemente dos materiais escolhidos. Para efeitos do último experimento a ser aqui apresentado, imaginou-se um programa funcional que abarcasse tais características.

A casa compartilhada foi pensada como um edifício de uso misto, residencial e comercial, inicialmente pensado para ser construído em regiões periféricas da metrópole, uma vez que, por um lado, há uma limitação da presença industrial, mas, por outro, mantém-se o acesso aos produtos industrializados. O programa de necessidades ambientais compôs dois dormitórios conjugados por uma área integrada de estar e cozinha. Mais especificamente foi composto por: 1) uma suíte de casal com entrada independente, conjugada a um escritório de trabalho, ou sala de recepção e atendimento de clientes; 2) uma suíte de casal com entrada independente por vestíbulo; e 3) uma sala de estar e jantar integrada a uma área de cozinha e serviços, com entradas independentes.

O partido da casa compartilhada foi criar uma habitação que detivesse todas as funções necessárias para que pudesse gerar minimamente uma renda própria, mesmo que fosse fixamente habitada por um indivíduo ou casal, que poderia alugar o dormitório restante.

Organização do trabalho

Conforme o contexto industrial brevemente descrito e sua problemática decorrente, observa-se um alargamento da profissão de arquitetura ao assumir a fabricação digital. Para se racionalizar o caminho que o arquiteto possa seguir nesse campo de atuação, sistematizou-se aqui uma base experimental que pudesse demonstrar métodos práticos a este profissional, em relação tanto a etapas de projeto quanto àquelas de construção. Nesse sentido, dividiu-se o texto desta tese em cinco capítulos que pudessem abarcar tais métodos.

No primeiro capítulo definem-se os principais conceitos da tese. 1) Produção digital, conforme Kolarevic (2003); 2) projeto digital, conforme uma série de autores que exploraram as técnicas de *Computer-Aided Architectural Design – CAAD*, ou *Building Information Modeling – BIM*, tais como William John Mitchell (1977), ou Chuck

Eastman (2014), respectivamente; 3) parametrização, de acordo com vários autores como Kolarevic (2003) Burry (2011), Schumacher (2011), Robert Woodbury (2010) etc.; 4) fabricação digital, principalmente conforme Kolarevic (2001) e Eric Teicholz (1985) que aprofundou a conceituação sobre *Computer-Aided Manufacturing – CAM*; e 5) fabricação robótica, cuja definição mais relevante para este trabalho foi encontrada em Sousa (2015). Conceitos subjacentes aos cinco principais também são abordados, como modelagem algorítmica, sistemas generativos e *CAE*. Ainda nesse capítulo, propõe-se o reconhecimento de Lelé como precursor da fabricação digital em Brasília – DF, assumindo o contexto onde o Beijódromo foi construído. Com isso, o trabalho desta tese contextualiza a fabricação digital como parâmetro originário do modo de produção, aqui adotado, como um todo.

O segundo capítulo apresenta o primeiro experimento de aplicação da produção digital em um projeto de arquitetura de Paulo Henrique Paranhos, a Catedral de Palmas – TO. Descreve-se, primeiramente, a relação entre o processo criativo arquitetônico e a parametrização e, em segundo momento, descreve-se o processo de detalhamento estrutural do projeto utilizando esta técnica. Discute-se um esclarecimento sobre como aplicar a parametrização em uma prática arquitetônica comum ao se compreender o seu potencial de criar um projeto que corresponda simultaneamente a diversos parâmetros. Nesse sentido, propõe um breve apontamento sobre a sua aplicação teórica e prática e, também, uma qualificação profissional que possa valorizar a arquitetura em áreas como as engenharias mecânica, civil e de produção, e no desenho industrial.

O terceiro capítulo apresenta o segundo experimento de aplicação da produção digital no projeto e construção de estruturas leves, em colaboração com o Coletivo *Voxel Lab*. Abordam-se aplicações artísticas no âmbito do projeto paramétrico e da fabricação digital, evidenciando como a automação dos processos pode ser útil para substituir etapas do trabalho artesanal, mas, por outro lado, comprovando como tal processo ainda não é possível de ser alcançado na escala de produção individual, no contexto de Brasília – DF.

Os dois capítulos anteriormente descritos conjugam uma reflexão sobre as aplicações reais da produção digital e explicitam a oportunidade de integração da engenharia e da fabricação digital nos esquemas de trabalho do arquiteto comum, na medida em que utilizar recursos paramétricos de projeto.

O quarto capítulo apresenta a produção realizada em estágio de doutorado no *DFL FAUP*, onde, de fato, há a aplicação da fabricação robótica em arquitetura. Durante esse estágio, pôde-se averiguar como a alta tecnologia corresponde aos desafios reais da construção civil, principalmente na busca por materiais frequentemente utilizados que possam ser fabricados com maior precisão e agilidade. Utilizou-se, para tanto, um projeto já em andamento do espaço de trabalho do próprio *DFL* em um galpão industrial do fornecedor que o sedia, para o desenvolvimento de um fechamento em *MDF*.

O quinto e último capítulo apresenta o experimento que sintetiza a pesquisa sobre integração da produção digital em arquitetura, onde se explorou, por meio do modelo algorítmico, sua aplicação desde etapas de criação até o detalhamento de fabricação digital da suposta estrutura metálica que configuraria os espaços para ocupação de uma casa compartilhada. Aborda-se uma explicação didática de todo o roteiro personalizado por processo CAEDM, com a intenção de constituir pesquisas posteriores e valorizar a inserção das técnicas utilizadas no currículo acadêmico e na prática da arquitetura e urbanismo.

A partir daí, traçaram-se as principais contribuições à área de concentração em Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade, especializada em técnicas e processos de produção do ambiente construído, do Programa de Pós-Graduação – PPG, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAU, da Universidade de Brasília – UnB. Destacam-se o reconhecimento da precursão de Lelé no uso da fabricação digital, com a obra do Beijódromo; as descrições procedurais dos projetos parametrizados aqui apresentados; e a articulação de um roteiro parametrizado que automatiza etapas de projeto e fabricação digitais para arquitetura.

Pertinência

Acredita-se que possa haver maior sustentabilidade na construção civil ao se produzir apenas os materiais necessários para uma obra, ao invés de necessitar de um estoque já existente, ou voltar a produção para recursos locais, ou minimizar e qualificar o trabalho artesanal e valorizar o trabalho de projeto. Portanto, revela-se a pertinência da tese no sentido de, ao menos, apontar um direcionamento para como proceder e o que almejar nesse campo de atuação.

A parametrização faz o arquiteto, ou estudante, entrar em contato com uma dimensão científica da arquitetura. A física da insolação que incide no edifício, a matemática do cálculo estrutural, os fluxos do comportamento no espaço, são todos parâmetros que precisam ser sistematizados na equação arquitetônica. Com a parametrização é possível automatizar tais parâmetros. Além disso, ela possibilita um caminho de compreensão sobre como programar o maquinário que poderá participar da construção de uma obra, a partir de uma compreensão mais aprofundada dos vários materiais de construção existentes.

Resultado principal esperado

Um roteiro parametrizado, desenvolvido por meio de uma definição *Grasshopper*®, que cria um sistema generativo *BIM*, personalizado por um processo *CAEDM*, para projeto e pré-fabricação dos elementos estruturais metálicos de um modelo de casa com cento e sessenta metros quadrados de área coberta.

CAPÍTULO 1

1.1 – Definição de Produção Digital e conceitos utilizados na tese

O conceito central desta tese é produção digital, que é o fundamento dos experimentos realizados. Define-se o conceito como a junção entre o projeto e fabricação digitais para automatização de processos arquitetônicos e construtivos. Kolarevic (2003) apresentou tal conceito por meio de uma série de exemplos da aplicação da produção digital em arquitetura, como projetos e obras de Frank Gehry, Bernhard Franken, Greg Lynn, Jakob + MacFarlane, Foster and Partners, entre outros.

O projeto digital é considerado tendo em vista as várias técnicas de projeção por meio do computador, tais como *Computer-Aided Design – CAD*, ou projeto assistido por computador; *Building Information Modeling – BIM*, ou modelagem da informação para construção; ou mais específicas para arquitetura, como *Computer-Aided Architectural Design – CAAD*, ou projeto arquitetônico assistido por computador.

No caso desta tese, enfatiza-se o uso da modelagem algorítmica para desenvolver o projeto arquitetônico paramétrico, ou parametrizado. A parametrização é um conceito chave aqui e será pormenorizada diante de um panorama de autores que já a definiram a partir de diferentes perspectivas.

Já a fabricação digital é considerada a partir dos avanços tecnológicos das duas últimas décadas, quando a robótica foi inserida de maneira mais acentuada no campo de pesquisa em arquitetura. Fabricação digital é uma prática ampla e bastante difundida tanto pelas obras de grandes arquitetos ao redor do mundo, quanto pela produção já popular de prototipagem rápida, impressão 3D, corte a laser etc. As máquinas de controle numérico computadorizado – CNC já estão difundidas desde a escala industrial até a escala do usuário doméstico e podem ser entendidas como robôs devido ao controle por computador. No entanto, as pesquisas realizadas nas duas últimas décadas apontaram para o uso de tecnologias avançadas, tais como o braço robótico, que é majoritariamente utilizado no âmbito da indústria de larga escala, mas começa a se tornar acessível para a produção, por exemplo, de espaços arquitetônicos. Portanto, no caso desta tese, entende-se que a fabricação digital abarca a fabricação robótica que é uma prática especializada do ponto de vista da sua manipulação e que exige o uso de técnicas avançadas para seu controle. O conjunto das técnicas de fabricação digital é compreendido dentro do processo *Computer-Aided Manufacturing – CAM*, ou manufatura assistida por computador.

Além da definição de fabricação digital por meio de diversos autores brasileiros e estrangeiros, esforça-se em caracterizá-la, também, dentro do contexto local, trazendo a obra de Lelé como uma referência de produção brasileira. Tal esforço é sustentado pela necessidade de se reconhecer a prática de um grande arquiteto que inovou, mas que ainda não foi analisado com maior profundidade dentro da perspectiva da fabricação digital.

Outros conceitos serão definidos aqui com a intenção de sistematizar a leitura deste texto, tais como: sistemas generativos, modelagem ponto a ponto, definição *Grasshopper*®, *Computer-Aided Engineering – CAE*, *file-to-factory* etc. Conceitos mais específicos, por exemplo, conceitos relacionados à matemática e lógica de computação serão definidos ao longo da tese, devido ao fato de serem conceitos mais pontuais.

1.1.1 – Projeto digital: CAD, CAAD, BIM, CAE

Há uma infinidade de técnicas *CAD* já disseminadas na prática profissional de arquitetura e engenharia. Félix Alves da Silva Jr. (2016) apresentou extenso histórico sobre *CAD*, abarcando desde os primórdios até as técnicas mais atuais. Em termos gerais, é uma técnica que se inicia na década de 1960 com o *software SketchPad*, criado por Ivan Sutherland, e que atualmente se encontra na maioria os *softwares* de computação gráfica orientados para projeto e construção civil.

A técnica *CAAD*, conforme William John Mitchell (1977), também data da década de 1960, sendo os primeiros avanços realizados nos EUA e Reino Unido. A técnica *BIM* é mais recente, quando os *softwares* começaram a incorporar princípios já comuns das áreas de engenharia, tornando-os mais orientados para os processos de construção. Chuck Eastman (2014) é a principal referência sobre *BIM* e teorizou sobre as diferenças entre o processo paramétrico *BIM* e o processo paramétrico baseado em linguagem de programação visual, ao afirmar as implicações distintas que ambos os processos conduzem.

A definição de sistema generativo foi encontrada, também, em Silva Jr. (2016), a partir de uma série de autores. Marcelo Fraile (2014, p. 8) definiu o sistema generativo como “uma série de algoritmos generativos” de formas por meio da utilização de *softwares* no computador.

Diferente da técnica de modelagem algorítmica, conforme conceituação de Kostas Terzidis (2006), há a técnica básica de modelagem ponto a ponto, onde o projetista, ao invés de inserir dados ou parâmetros no *software* de modelagem tridimensional, modela todas as formas a partir de diversas operações geométricas que ele mesmo precisa articular para alcançar o resultado pretendido.

Computer-Aided Engineering – CAE foi conceituado por Andrew Tizzard (1994, p. 1, tradução nossa) como “[...] a performance de tarefas de engenharia ou funções com o auxílio de um computador.⁶”, considerando-se que tal performance é controlada pelo engenheiro em suas diversas etapas. O autor afirmou o caráter multidisciplinar da engenharia e, nesse sentido, valorizou a adoção do processo *CAE* de maneira ampla, ou seja, independente da especialidade, seja ela voltada para a mecânica, de produção, civil etc.

Sousa e Duarte (2005), do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa IST-UTL, apresentaram uma interessante justificativa para a implantação de tecnologias avançadas na construção civil, mesmo em condições limitantes. Como, por exemplo, o caso brasileiro, onde há uma defasagem com relação às tecnologias de construção. Sousa e Duarte (2005) argumentam que há uma tendência ao se considerar as tecnologias digitais como detentoras de um poder de trazer uma linguagem emergente na arquitetura. Contudo, afirmam que as reais limitações construtivas impõem dificuldades práticas que vão muito além da simples crença de que a customização em massa possa ocorrer da mesma forma que a padronização seriada, devido ao uso de máquinas controladas por computador. Propuseram o desafio de implementar o avanço dado ao projeto, também, à etapa de fabricação, mas ainda não abordaram a robótica. Propuseram, também, que o processo *Computer-Aided Engineering – CAE* seja integrado ao processo arquitetônico.

O processo *file-to-factory* é uma denominação dada à comunicação direta entre o projetista e o fabricante, que recebe os arquivos para produção, assim como em um *FabLab*, onde é requerido o fornecimento das informações para fabricação de um objeto. Kolarevic (2003) apontou a relação entre o projeto digital e a fabricação digital por processos *file-to-factory* ligados ao controle numérico computacional – CNC e Kas Oosterhuis [et al.] (2004) definiram tal processo como:

⁶ Original: “[...] the performance of engineering tasks or functions with the aid of a computer.” (TIZZARD, 1994, p. 1).

[...] a mistura contínua do processo de projeto na fabricação. Envolve a transferência direta de dados de um *software* de modelagem 3D para uma máquina CNC (controlada numericamente por computador). Emprega estratégias de projeto e fabricação digitais baseadas em conceitos computacionais.⁷ (OOSTERHUIS [et al.], 2004; p. 295, tradução nossa).

Há uma grande variedade de técnicas e aplicações disponíveis para o projeto de arquitetura. Todavia, uma das técnicas mais debatidas na atualidade é a parametrização.

1.1.1.1 – Parametrização em arquitetura

O *Center for Land Use and Built Form Studies – LUBFS*, criado por Leslie Martin e Lionel March, em 1967, lançou programa precursor de modelagem algorítmica para estudos urbanísticos de ocupação do solo, em Cambridge, Reino Unido. O computador possibilitou a parametrização dos estudos de planejamento a partir de diversos parâmetros, tais como insolação, legislação local, altura máxima das edificações. Pesquisadores do centro de pesquisa mencionado confirmaram como a utilização da técnica poderia otimizar o trabalho de projeto arquitetônico e urbanístico:

[...] a técnica de simular um projeto, seja parcial ou totalmente, na forma de um modelo computável cuja estrutura é matemática, é exatamente o caminho para avaliar sua performance prevista com um maior grau de realismo. Cálculos que eram tediosos e, de fato, impraticáveis por razões de prazo tornam-se subitamente possíveis. Não apenas condições ambientais externas podem ser simuladas, mas também o padrão premeditado de uso do edifício.⁸ (BULLOCK; DICKENS; STEADMAN, 1972, p. 108, tradução nossa)

Desse contexto surgiu o pensamento diagramático, tendo como figuras centrais Christopher Alexander (1964) e Peter Eisenman (1963), ao colocarem em debate uma mesma problemática de matematização do projeto arquitetônico, de forma a sistematizá-lo, mas por perspectivas distintas. A grosso modo, Alexander (1964), de um lado, colocou a ciência e objetividade como intervenientes na arquitetura,

⁷ Original: “*File to factory refers to the seamless merging of the design process into fabrication. It involves direct transfer of data from a 3D modeling software to a CNC (computer numeric controlled) machine. It employs digital design and fabrication strategies based on computational concepts.*” (OOSTERHUIS [et al.], 2004; p. 295).

⁸ Original: “[...] *the technique of simulating a design, either partial or complete, in the form of a computable model whose structure is mathematical, is exactly the way to evaluate its predicted performance with a high degree of realism. Calculations which were tedious and, in effect, impracticable for reasons of time become suddenly possible. Not only can external environmental conditions be simulated, but also the anticipated pattern of use of the building.*” (BULLOCK; DICKENS; STEADMAN, 1972, p. 108).

Eisenman (1963), de outro lado, assumiu a arte e a subjetividade. Considera-se que tais pesquisas são as bases para o atual pensamento de projeto arquitetônico parametrizado.

Tendo-se em vista tais pontos de origem, compreende-se que a parametrização não é uma técnica nova na arquitetura e urbanismo. Mesmo assim, está ainda em evolução e os *softwares* atuais de modelagem tridimensional estão se tornando mais acessíveis ao arquiteto que busca soluções espaciais integradas a tecnologias capazes de viabilizar obras complexas, o que possibilita a idealização de organizações espaciais e maneiras personalizadas de se construir. Tais *softwares* estão possibilitando o controle computadorizado de etapas de determinados processos construtivos, desde o projeto à execução, possibilitando usos e funções específicos, além de formas, texturas e volumes que potencializam um repertório a ser acrescido aos meios estandardizados da arquitetura, de maneira cada vez mais prática.

No entanto, parametrização não é um conceito de domínio público, nem mesmo entre os arquitetos. É com frequência erroneamente confundido com outros conceitos. A ação de parametrizar, ou colocar uma medida, um cálculo, ao lado de, por exemplo, uma geometria, foi inicialmente apropriada pela engenharia mecânica para calcular a movimentação das máquinas, de seus fluidos etc. Na arquitetura, possibilita calcular as geometrias por meio de algoritmos que geram as regras de construção e fabricação de elementos construtivos e dos espaços arquitetônicos. Na literatura recente uma das melhores definições sobre parametrização é aquela apresentada por Kolarevic (2003):

No projeto paramétrico, são os parâmetros de um projeto específico que são declarados, não seu formato. Pela atribuição de diferentes valores aos parâmetros, diferentes objetos ou configurações podem ser criados. Equações podem ser usadas para descrever as relações entre objetos, assim definindo uma geometria associativa – a “geometria constituinte que é mutuamente ligada”. Dessa maneira, interdependências entre objetos podem ser estabelecidas, e o comportamento dos objetos sobre transformações ser definido [...]. Pela primeira vez na história, arquitetos estão projetando não o formato específico do edifício, mas um conjunto de princípios codificados como uma sequência de equações paramétricas pelas quais instâncias específicas do projeto podem ser geradas e variadas no momento, conforme necessário. O projeto paramétrico apela à rejeição de soluções fixas e à

exploração de potencialidades infinitamente variáveis⁹ (KOLAREVIC, 2003, p. 17-18, tradução nossa).

O arquiteto precisa parametrizar seu projeto, porque ao fazê-lo torna o trabalho de projeto e construção mais eficiente, por meio da automatização de etapas do processo. A utilização da parametrização possibilita fundamentar em dados reais as várias decisões de projeto, incluindo os aspectos plásticos, auxiliando o arquiteto trabalhar com uma solução integrada entre o projeto e sua execução no canteiro.

Algumas vantagens do uso da parametrização no projeto arquitetônico são: melhor relacionamento entre arquitetura e engenharia (maior integração entre as duas profissões); meios de trabalho mais valorizados para os arquitetos e designers (com caráter científico agregado); utilização de recursos e materiais diferenciados dos padronizados pelo mercado; maior integração entre projetistas e fabricantes, por meio da utilização de sistemas avançados. Algumas desvantagens: falta de um protocolo de projeto organizado de acordo com os recursos disponíveis na região; processo de negociação entre projetistas e fabricantes sobre a divisão de tarefas do processo produtivo; ausência de cultura de projeto e construção que integre factualmente o uso de tecnologias avançadas. Mesmo havendo certas desvantagens, percebe-se o potencial de tais aplicações no projeto de arquitetura, tendo em vista uma perspectiva de melhoria das condições de trabalho profissional.

A proposta de criar um roteiro é uma maneira de vincular a técnica à prática comum de projeção em arquitetura. O roteiro de produção digital encadeia um processo *file-to-factory* ao projeto arquitetônico, ou seja, o projeto deixa de apenas representar a forma arquitetônica, que necessitará ser interpretada pelo construtor da obra, para apresentar as próprias informações para a fabricação das peças a serem montadas no canteiro de obras.

⁹ Original: “In parametric design, it is the parameters of a particular design that are declared, not its shape. By assigning different values to the parameters, different objects or configurations can be created. Equations can be used to describe the relationships between objects, thus defining an associative geometry – the “constituent geometry that is mutually linked”. That way, interdependencies between objects can be established, and objects’ behavior under transformations defined [...]. For the first time in history, architects are designing not the specific shape of the building but a set of principles encoded as a sequence of parametric equations by which specific instances of the design can be generated and varied in time as needed. Parametric design calls for the rejection of fixed solutions and for an exploration of infinitely variable potentialities.” (KOLAREVIC, 2003, p. 17-18).

1.1.1.2 – Técnica de parametrização aplicada à arquitetura

O conceito de parametrização é compreendido por meio de uma diversidade de autores. Schumacher (2012) evidenciou uma agenda de compromissos que a arquitetura deve assumir em favor da parametrização, propondo o parametricismo como o estilo que define essa fase que vivemos da história da arquitetura. O autor definiu estilo como um “programa de pesquisa em projeção” (SCHUMACHER, 2012, p. 618) e fundamentou o parametricismo principalmente por meio da teoria de sociedade de Niklas Luhmann, baseada na teoria de sistemas aplicada à sociologia. No entanto, por mais ambiciosa a proposta do referido autor, deve se ter em conta que os processos entre os diversos países são diferentes, então as abordagens sobre o uso da parametrização, ao longo do processo de projeto, devem considerar particularidades do contexto em relação aos padrões de construção civil. No caso específico de uma aplicação da parametrização em Brasília, ainda o próprio Schumacher (2012) é quem evidenciou um elo entre parametricismo e movimento moderno, ao afirmar Frei Otto como precursor da busca por complexidade formal para os espaços construídos.

A limitação de Le Corbusier não é sua insistência sobre ordenação, mas sua concepção limitada de ordem em termos de geometria Clássica. A teoria da complexidade (ou teoria do caos) em geral, e a pesquisa de Frei Otto em particular, nos ensinou a reconhecer, mensurar e simular os padrões complexos de ordem que emergem de processos de auto-organização¹⁰ (SCHUMACHER, 2012, p. 681, tradução nossa).

Burry (2011) apresentou uma crítica à proposição de Patrik Schumacher (2012) sobre a classificação do parametricismo como o próximo estilo depois do moderno. O autor contrapôs a posição cultural do arquiteto alemão com a de Cecil Balmond (2007) – engenheiro cingalês, ex-vice-presidente da empresa inglesa Arup, de construção civil – que mantém uma preocupação a respeito do projetista individual diante das dificuldades naturais da prática: “[...] de um lado temos a posição promulgada como ‘qualquer coisa serve’ pelo proeminente praticante Cecil Balmond, e do outro lado ‘o

¹⁰ Original: “Le Corbusier’s limitation is not his insistence upon order but his limited concept of order in terms of Classical geometry. Complexity theory (or chaos theory) in general, and the research of Frei Otto in particular, have since taught us to recognize, measure and simulate the complex patterns of order that emerge from processes of self-organization.” (SCHUMACHER, 2012, p. 681).

próximo grande movimento é...’ de Patrik Schumacher.” ¹¹ (BURRY, 2011, p. 27, tradução nossa).

Reforçando esse pensamento, Burry (2011) explicitou a relação entre as escalas produtivas local e global, afirmando que a conectividade permitida pela Internet torna desnecessários movimentos de impacto mundial. Cada cultura se apropriaria, por exemplo, da parametrização a partir dos próprios recursos, dentro das próprias limitações. Pode se afirmar, portanto, que uma das principais influências sobre o uso da parametrização constitui-se no próprio contexto industrial local, pressupondo-se que em situações de baixo avanço tecnológico o uso da parametrização poderia ter outra natureza que a busca por formas complexas e soluções plásticas.

Em suma, Burry (2011) enfocou em como aperfeiçoar a arquitetura produzida a partir de métodos e processos computacionais, fundamentando-se na parametrização em conjunto com a fabricação digital para buscar organizações de trabalho capazes de lidar com demandas complexas. O autor apresentou diversos exemplos de relevância dessa combinação produtiva, entre eles as obras de complementação realizadas para a Sagrada Família de Antoni Gaudí, em Barcelona.

Cecil Balmond (2007) apresentou uma prática voltada para resolução de problemas de engenharia para os mais variados arquitetos desde Peter Eisenman até Álvaro Siza. Apesar de não definir a parametrização de maneira explícita, subentende-se que a técnica constituiu a base de sua produção em todos os projetos que apresentou, uma vez que associa o cálculo estrutural às geometrias dos projetos arquitetônicos detalhados. Balmond (2007, p. 113, tradução nossa) teorizou sobre o informal como “as características não-lineares do projeto¹²” e afirmou que: “o informal tem três características principais: local, híbrido e justaposto. Elas são ingredientes ativos de uma geometria animada que abarca o linear e o não-linear. Ambas as geometrias Cartesiana e pós Einsteiniana estão nela envolvidas.¹³” (BALMOND, 2007, p. 226-227, tradução nossa). Nesse sentido, entende-se como precursor o trabalho

¹¹ Original: “[...] on the one hand we have a position promulgated as ‘anything goes’ by a leading practitioner Cecil Balmond, and on the other ‘the next major movement is...’ from Patrik Schumacher.” (BURRY, 2011, p.27).

¹² Original: “*informal: The non-linear characteristics of design.*” (BALMOND, 2007, p. 113).

¹³ Original: “*The informal has three principal characteristics: local, hybrid and juxtaposition. They are active ingredients of an animate geometry that embraces the linear and non-linear. Both Cartesian and post Einsteinian geometry are encompassed by it.*” (BALMOND, 2007, p. 226-227).

do engenheiro referido, que colaborou em importantes obras arquitetônicas no mundo todo.

Woodbury (2010, p. 11, tradução nossa) definiu modelagem paramétrica, de forma bastante específica, em comparação ao uso de lápis e papel: “a *modelagem paramétrica* (também conhecida como *modelagem de restrição*) introduz uma mudança fundamental: “*marcas*”, ou seja, *partes de um projeto*, relacionam-se e alteram-se em conjunto de forma coordenada”¹⁴. A definição do autor é bastante específica, apresentando as bases para a compreensão de que independente de um *software* o projetista deve conseguir pensar algoritmicamente, construindo os parâmetros requeridos para transformar/organizar a geometria de determinado espaço. De certa forma, o que se interpreta é que a parametrização deve ser uma atitude requerida ao arquiteto para evoluir a discussão sobre sua função social, que deve cada vez mais se fundamentar cientificamente.

Woodbury (2010) compreendeu a parametrização mais como uma atitude da mente do que a aplicação de um *software* específico. É um raciocínio que requer conhecimento de geometria e programação, portanto, os profissionais envolvidos nesta metodologia precisam ter conhecimento cada vez mais avançado de aspectos técnicos da produção fabril. O autor referido apresentou diversas operações matemáticas e de programação, tais como criação de geometrias não-euclidianas, aplicações de geometrias complexas no projeto, entre outras, necessárias para o trabalho paramétrico, constituindo um manual de referências úteis aos projetistas.

Oosterhuis (2012, p. 419-420) definiu a questão do projeto paramétrico tendo em vista uma prática de projeto, inclusive sobre as relações com os clientes. O primeiro ponto importante é a vinculação que o autor propôs entre o projeto paramétrico e a metodologia *BIM*, afirmando a parametrização como aquilo que fundamenta a modelagem da informação da construção. O autor afirmou que o problema da modelagem por sistemas *BIM* “está na existência acordada de bibliotecas digitais standardizadas. [...] uma vez que componentes construtivos sejam definidos como espécies separadas em um catálogo construtivo lhes serão permitidos ter

¹⁴ Original: “*Parametric modeling (also known as constraint modeling) introduces a fundamental change: “marks”, that is, parts of a design, relate and change together in a coordinated way.*” (WOODBURY, 2010, p. 11).

apenas um número limitado de relações com outras espécies.”¹⁵ (OOSTERHUIS, 2012, p. 416, tradução nossa). Portanto, o uso da parametrização possibilita modelar a informação da construção de forma personalizada, possibilitando a obtenção da informação construtiva de qualquer geometria, independentemente de sua complexidade, ao mesmo tempo em que processa as informações para a construção controlada numericamente, por meio do processo *file-to-factory*.

Outro ponto importante que o arquiteto holandês estabeleceu é sobre o papel social que o projetista precisa adotar ao trabalhar com a parametrização, assumindo uma nova série de responsabilidades de acordo com o nível de especialização do serviço prestado.

Uma vez que arquitetos não estandardizados [...] têm controle total e plena confiança que seus dados estão corretos e precisos, eles precisam assumir a responsabilidade pela engenharia da geometria, e naturalmente precisam ser pagos proporcionalmente por tal responsabilidade. Uma vez que arquitetos não estandardizados estão entre os poucos profissionais com total conhecimento de como os procedimentos de produção CNC estão imbuídos da lógica do próprio projeto, eles também precisam ser remunerados para assumir a responsabilidade por gerenciar o vínculo direto entre projeto e engenharia¹⁶ (OOSTERHUIS, 2012, p. 419, tradução nossa).

Eastman definiu o procedimento padrão adotado nos programas *BIM*, afirmando que: “em arquitetura, as empresas de *software BIM* predefiniram um conjunto base de famílias de objetos de construção para os usuários, que podem ser estendidas, modificadas ou acrescidas.” (EASTMAN, 2014, p. 25). É o que intitulou como modelagem paramétrica baseada em objetos, em oposição aos objetos paramétricos personalizados pelo usuário. “Quando se estão desenvolvendo famílias de objetos personalizados usando *B-rep* ou parâmetros, é importante que os objetos carreguem os atributos necessários aos diversos cálculos [...], como estimativas de custos e análises estruturais ou de energia.” (EASTMAN, 2014, p. 39). O autor apresentou repertório de estudos de caso da utilização *BIM* e modelagem paramétrica na construção civil, apresentando edifícios de grande porte, importantes no cenário

¹⁵ Original: “The problem is in the agreed existence of standard digital libraries. [...] Once building components are defined as separate species in the building catalog, they will be allowed to have only a limited number of relationships with other species.” (OOSTERHUIS, 2012, p. 416).

¹⁶ Original: “Since nonstandard architects [...] have full control and full confidence that their data are correct and accurate, they must take on the responsibility for the engineering of the geometry, and naturally must be paid proportionally for this responsibility. Since nonstandard architects are among the few parties to have a full knowledge of how the CNC production procedures have embedded part of the logic of the design itself, they should be remunerated to take the responsibility for managing the direct link from design to engineering as well.” (Oosterhuis, 2012, p. 419).

internacional, tais como o Centro Aquático Nacional de Pequim, entre outros edifícios projetados por arquitetos como Jean Nouvel e Morphosis.

A respeito das práticas computacionais, do uso do computador como instrumento de projeto, Mitchell (2001) dissertou sobre as relações estabelecidas pelo trabalho de Frank Gehry em oposição à tradicional prática CAD como instrumental de representação gráfica e documentação do projeto. “Gehry embarcou em uma exploração de um universo formal que não foi menos rigorosamente lógico e matematicamente elegante do que a geometria da Grécia antiga, mas que [...] não era acessível antes que a tecnologia da computação gráfica o destravasse.”¹⁷ (MITCHELL, 2001, p. 356, tradução nossa). Na verdade, o ponto chave abordado pelo autor é a relação entre computação e arquitetura, como a primeira promoveu uma mudança radical na segunda e como ainda pode alterar a prática profissional na arquitetura. O autor fez uma breve análise da mudança dos meios tradicionais – apontando as limitações que a geometria euclidiana estabelece aos projetistas – para o uso do computador, sem ainda abordar a parametrização da forma como os autores mencionados anteriormente o fizeram. Por fim, avaliou os processos de projeto e construção também colocando em questão as relações CAD/CAM como transformadoras da possibilidade de construir edifícios bem mais complexos dos habituais com um esforço bem menor daquele que seria necessário sem o uso do computador.

1.1.2 – Fabricação digital: sistematização da tecnologia no processo construtivo

A constituição da fabricação digital ocorre por meio da sistematização do processo CAD/CAM, que se compreende como uma prática de projeto assistido por computador, com a finalidade de informar a execução de maquinário controlado por computador para o processamento físico de materiais de construção. No prefácio do livro “CAD/CAM Handbook”, Eric Teicholz (1985) afirmou a integração ocorrida entre os dois sistemas desde a década de 1970. Os diversos pesquisadores que contribuíram para o conteúdo do livro referido (ORR, 1985; BORRELL, 1985; MITCHELL, 1985; REEVE JR., 1985), relacionaram a integração das ferramentas digitais por *software* e *hardware*; a aplicação no campo da Arquitetura, Engenharia,

¹⁷ Original: “Gehry embarked on an exploration of a formal universe that was no less rigorously logical and mathematically elegant than that of ancient Greek geometry, but which – as a practical matter – had been inaccessible before computer-graphics technology unlocked it.” (MITCHELL, 2001, p. 356).

Construção – AEC; e, inclusive, introduziram estudo sobre fabricação robótica para várias aplicações, desde a indústria automobilística, até operações complexas ou perigosas para o operário humano.

A fabricação digital é compreendida por meio das conceituações encontradas em Kolarevic (2001) que definiu diversos métodos de fabricação controlada por computador, apresentando exemplos de aplicação em vários edifícios conhecidos pelo alto nível de complexidade construtiva. O autor conceituou o processo *CAD/CAM*, afirmando que as relações estabelecidas entre esses dois processos “[...] abriram novas oportunidades permitindo a produção e construção de formas bastante complexas que até recentemente eram muito difíceis e dispendiosas para o projeto, produção e montagem por meio de tecnologias construtivas tradicionais.”¹⁸ (KOLAREVIC, 2001, p. 269, tradução nossa). Apresenta-se, portanto, a relação intrínseca entre o método de projeto assistido por computador – *CAD* e os processos de corte bidimensional, modelagem tridimensional, impressão tridimensional, conformação, que compreendem a manufatura assistida por computador – *CAM*.

A teoria da *autopoiesis* da arquitetura de Schumacher (2011) justificou uma prática onde ocorre uma criação própria da arquitetura, independente do trabalho artesanal, por meio de fabricação controlada por computador. *Autopoiesis*, cuja etimologia grega significa “*auto*” como próprio e “*poiesis*” como criação, é um termo emprestado dos biólogos e filósofos chilenos Humberto Maturana e Francisco Varela, que na década de 1970 investigavam o processo de autocriação dos organismos vivos. Schumacher (2011) transpôs tal conceito para a arquitetura. À semelhança das indústrias automobilísticas automatizadas por robôs, a arquitetura poderia ser construída por máquinas programadas para diversas operações, como marcenaria, serralheria, alvenaria. Portanto, haveria mesmo uma mudança de paradigma frente aos métodos de construção mais utilizados, atualmente. No entanto, são muitas as dificuldades encontradas na aplicação prática de tal teoria, uma vez que as barreiras econômicas são evidentes e as pesquisas na área são proeminentemente orientadas para produções caras que requerem recursos elevados.

¹⁸ Original: “They [*CAD/CAM processes*] opened up new opportunities by allowing production and construction of very complex forms that were until recently very difficult and expensive to design, produce and assemble using traditional construction technologies.” (KOLAREVIC, 2001, p. 269).

1.1.2.1 – Aplicações da robótica na arquitetura: breve panorama histórico na civilização ocidental

Antes do desenvolvimento das máquinas por meio do computador a arquitetura de vanguarda foi expressão da máquina mecanizada, do automóvel, do avião, do navio, desde os pioneiros da arquitetura moderna no final do século XIX. Reyner Banham (1960) introduziu tal contexto como pertencente à primeira era da máquina, desde Tony Garnier e Auguste Perret, estendendo-a até Le Corbusier e a Bauhaus. A arquitetura expressou simbolicamente a máquina por meio de novos materiais, tais como o concreto armado, e alinou-se às vanguardas modernas como o futurismo italiano, o De Stijl e o cubismo. De acordo com Banham (1960), os principais exemplos dessa expressão foram o Pavilhão Barcelona de Mies Van Der Rohe, “*Les Heures Claires*”, ou *Villa Savoye*, de Le Corbusier, e a *Dymaxion House* de Buckminster Fuller.

Ainda no período moderno, Stephen Phillips (2017) inseriu a obra experimental de Frederick Kiesler como pertencente à primeira era da cultura robótica. O trabalho de cenografia do arquiteto austro-húngaro para o teatro experimental de Karel Čapek apresentou pela primeira vez o conceito de robô, na peça *R.U.R. (Rossum’s Universal Robots)*, em 1920. Posteriormente, já na década de 1960, Kiesler estabeleceu uma trajetória inovadora não como construtor, mas como pesquisador em arquitetura especulativa, o que repercutiu nas futuras gerações.

A partir dessas ações precursoras, práticas experimentais, como do grupo britânico *Archigram*, ainda na década de 1960, extrapolaram o senso comum, ao projetarem cidades móveis e futurísticas, máquinas habitáveis, tais como “*Living City*” ou “*Walking City*” (COOK, 1999). A crescente industrialização e o uso cada vez maior de máquinas para controlar e automatizar as edificações colaboraram para estabelecer um perfil da aplicação da tecnologia no ambiente construído.

A pesquisa científica de aplicação da robótica como instrumento de fabricação de elementos arquitetônicos tem sua origem no grupo estadunidense *Architecture Machine Group*, do MIT, liderado por Nicholas Negroponte, em 1967 (MITCHELL, 1977; p. 16). No mesmo ano, o *LUBFS*, liderado por Leslie Martin e Lionel March (KRÜGER, 2005, p. 18), lançou seu programa de estudos urbanísticos, conforme descrição da seção anterior sobre “Parametrização”.

Sobre os trabalhos de pesquisa realizados, Negroponte (1970) apresentou uma visão vanguardista para sua época, que, atualmente, pode ser considerada ainda incompleta:

É razoável supor que a presença de máquinas, de automação em geral, forneça algumas das informações omitidas e difíceis de adquirir. No entanto, parece tolice supor que, quando as máquinas souberem projetar, não haverá informações ausentes ou que um único projetista possa fornecer à máquina tudo o que precisa. Consequentemente, nós, o *Architecture Machine Group* do M.I.T., estamos embarcando na construção de uma máquina que possa trabalhar com informações ausentes. Para fazer isso, uma máquina de arquitetura deve entender nossas metáforas, solicitar informações por conta própria, adquirir experiências, conversar com uma grande variedade de pessoas, melhorar ao longo do tempo e ser inteligente. Ela deve reconhecer o contexto, particularmente as mudanças nos objetivos e as mudanças no significado provocadas pelas mudanças no contexto¹⁹ (NEGROPONTE, 1970; p. 119-121, tradução nossa).

Até certo ponto, o braço robótico é exemplo desse pensamento que, em sua época, ainda era um objetivo a ser alcançado. O braço robótico em conjunto com a internet das coisas e inteligência artificial torna-se, na indústria 4.0, um operário digital capaz de processar diferentes materiais ao utilizar diferentes ferramentas. Tal capacidade é controlada pela programação do operário humano que estabelece uma colaboração com o robô, ao emprestar sua inteligência e ao construir em conjunto com o robô que compartilha sua força e precisão. Nesse sentido, estabelece-se uma relação mútua entre a máquina e o humano por meio digital. O braço robótico é um equipamento de escala industrial, controlado por computador, que é utilizado para operações repetitivas de precisão nas linhas de produção de fábricas automotivas, náuticas e aeroespaciais, mas que vem se tornando acessível para as indústrias de construção civil onde é utilizado para operações personalizadas com inúmeros movimentos singulares. Ronald C. Reeve Jr. (1985) compreendeu o robô industrial por meio de duas definições, tanto a definição da *Japanese Industrial Robot Association – JIRA*, quanto a definição do *Robot Institute of America*. A associação

¹⁹ Original: “It is reasonable to assume that the presence of machines, of automation in general, will provide for some of the omitted and difficult-to-acquire information. However, it would appear foolish to suppose that, when machines know how to design, there will be no missing information or that a single designer can give the machine all that it needs. Consequently, we, the *Architecture Machine Group* at M.I.T., are embarking on the construction of a machine that can work with missing information. To do this, an architecture machine must understand our metaphors, must solicit information on its own, must acquire experiences, must talk to a wide variety of people, must improve over time, and must be intelligent. It must recognize context, particularly changes in goals and changes in meaning brought about by changes in context.” (NEGROPONTE, 1970; p. 119-121).

japonesa categorizou o robô em seis níveis, manipulador manual, robô de sequência fixa, robô de sequência variável, robô de reprodução, robô numericamente controlado e robô inteligente. O instituto americano definiu o robô como: “um manipulador reprogramável e multifuncional projetado para mover materiais, partes, ferramentas ou dispositivos específicos, por meio de movimentos programados variáveis para o desempenho de uma variedade de tarefas.”²⁰ (REEVE JR., 1985, p. 15.3, tradução nossa).

1.1.2.1.1 – Primeiro contato com a robótica em arquitetura

Tendo em vista este breve contexto histórico, procurou-se ordenar cronologicamente a análise da aplicação da robótica na arquitetura, a partir da apreensão pessoal ao longo de quinze anos de trabalho. Portanto, tratar-se-á do assunto a partir de um recorte fundamentado em experiências obtidas na prática e na observação cotidiana dos avanços dentro do campo de pesquisa acadêmica relacionado.

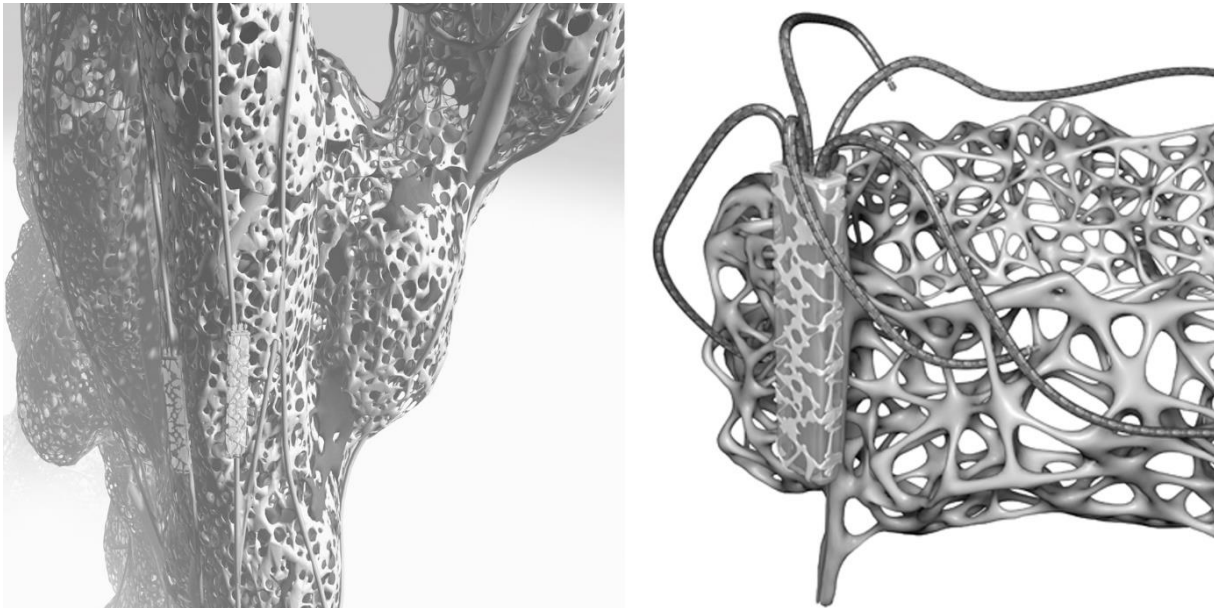
A primeira referência é a prática arquitetônica *New-Territories*, sob a liderança do arquiteto francês François Roche. Em 2005, a exposição “*I’ve heard about*” no *Couvent de Cordeliers* em Paris, apresentou um modelo de cidade auto criada, auto construída, onde os próprios moradores organizariam o melhor arranjo espacial, por meio de códigos de construção que seriam lidos por máquinas que, conseqüentemente, construiriam os desejos dos habitantes (R&SIE(N); DURANDIN, 2005) (Fig. 1). Uma demonstração extremamente criativa do uso da robótica, claramente observada a partir desse passado de quarenta anos atrás, na tentativa de imbuir as aplicações de conteúdos inusitados, relativos aos sentimentos e sensações dos seres. O papel da máquina é central para a percepção do próprio edifício; edifício e máquina mesclados em uma identidade singular.

A maior parte dos projetos da prática arquitetônica *New-Territories* apresenta alguma relação com a robótica. O projeto intitulado “*He shot me down*” (Fig. 2), relacionou a máquina como um servente da casa, constantemente em busca de substrato orgânico para abastecer a fachada verde que revestiria toda a residência. É um processo construtivo, paisagístico, um organismo sintético que recolhe material

²⁰ Original: “A reprogrammable, multifunctional manipulator designed to move materials, parts, tools or specialized devices, through variable programmed motions for the performance of a variety of tasks.” (REEVE JR., 1985, p. 15.3).

vegetal em um modo contínuo para camuflar a casa no contexto ao seu redor, e a identidade do projeto é marcada pelo robô que opera essa função. De certa forma, a máquina é um dos materiais que compõem a construção do espaço (DI RAIMO, 2014; p. 41).

Figura 1 – Modelo de cidade roboticamente construída, intitulada “*I’ve heard about*”.



2005. Crédito da imagem: *New-Territories.com*.

Figura 2 – Projeto de habitação multifuncional, intitulado “*He Shot Me Down*”.



2006. Crédito da imagem: *New-Territories.com*.

Figura 3 – Projeto para concurso de arquitetura *FRAC* Orléans, intitulado “*Olzweg*”.



2006. Crédito da imagem: *New-Territories.com*.

O projeto “*Olzweg*” (Fig. 3) centraliza a máquina que, também em modo contínuo, reconfigura os acessos da edificação, estabelecendo um dinamismo, um movimento para o próprio edifício. O projeto participou do concurso de reforma do *FRAC* Orléans, na França, e do ponto de vista da utilização da robótica na arquitetura representa um potencial construtivo constante do braço robótico que se torna protagonista de uma narrativa gerada a partir do rearranjo perpétuo das entradas e saídas da edificação original, um prédio histórico do século XVIII na cidade de Orléans que sedia o *Fonds Régional d’Art Contemporain de la Région Centre – FRAC*. (DI RAIMO, 2014; p. 60)

Oportunamente, eu tive a chance de trabalhar neste escritório de arquitetura, durante alguns meses, entre os anos de 2005 e 2006. Nesse momento, a equipe de trabalho era organizada de maneira bastante horizontalizada e as decisões de projeto eram tomadas em conjunto, em diversas situações, mas com metodologias sistemáticas de produção. Havia já na época equipes de programação computacional dentro do escritório, e um dos arquitetos associados era especializado na área de robótica.

1.1.2.1.2 – Aplicações da robótica em arquitetura na primeira década do século XXI europeu

Após esse primeiro contato como uma produção robótica aplicada à arquitetura, houve a divulgação do Pavilhão da Suíça (Fig. 4), na Bienal de Arquitetura de Veneza de 2008, de autoria de Fabio Gramazio e Matthias Kohler. Contudo, em pesquisas mais recentes reconhece-se que as investigações desse grupo já estavam em andamento em períodos anteriores. Um dos primeiros projetos acadêmicos, intitulado “*The Informed Wall*”, foi publicado em 2006, indicando que há mais tempo já estava sendo elaborado. Tal equipe do Instituto Federal de Tecnologia – *ETH*, de Zurique, é uma das mais ativas e já apresentou diversas soluções de aplicação da robótica na construção civil, demonstrando, assim, um trabalho intensivo de pesquisa a respeito de uma produção digital em arquitetura.

Figura 4 – Pavilhão da Suíça na Bienal de Arquitetura de Veneza.

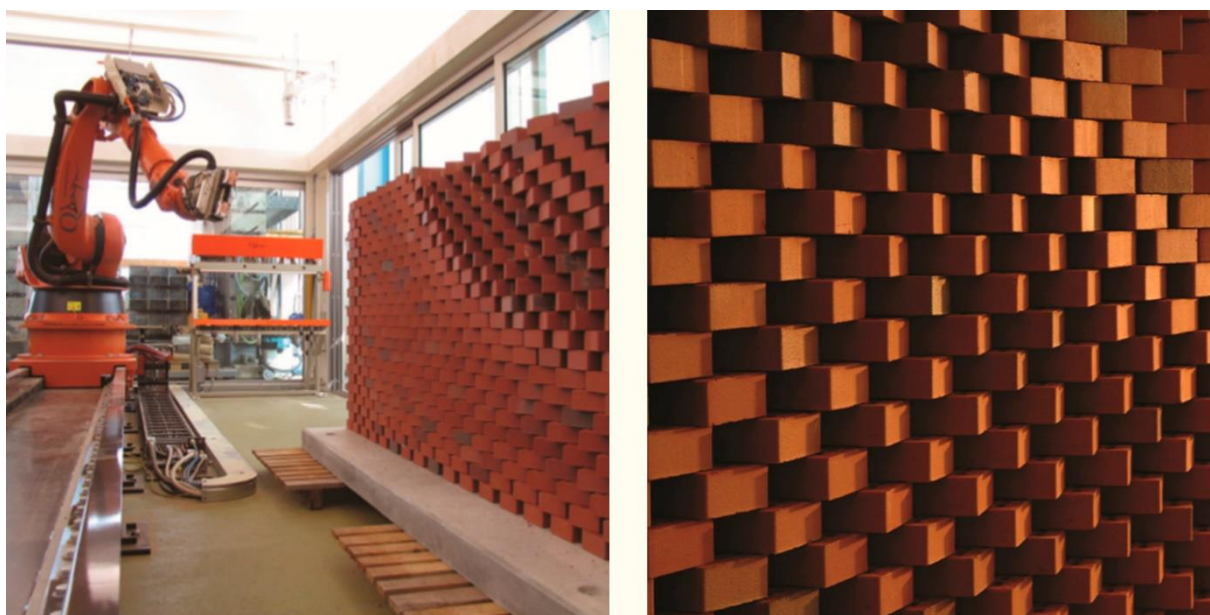


2008. Crédito da imagem: Fabio Gramazio e Matthias Kohler.

Tobias Bonwetsch [et al.] (2006) publicaram o relatório de pesquisa sobre o projeto “*The Informed Wall*”, de deposição de tijolos por braço robótico, que apresenta experimentos de construção robotizada de paredes de alvenaria, a partir do que se definiu como a prática de “*informing architecture*”, ou arquitetura informada. Primeiramente, os autores definiram o processo aditivo em comparação aos processos subtrativos, apontando a vantagem de depositar o material no local preciso, sem desperdícios. Depois, apresentaram o método de manipulação do braço robótico,

dentro de um ambiente controlado de laboratório de pesquisa, uma vez que se considerou a interação com estudantes da *ETH* Zurique durante a fase de produção experimental com o maquinário. Posteriormente, descreveram os métodos de projeto e fabricação dos protótipos. Os projetos foram realizados no *software Maya*® em conjunto com sua linguagem de programação *Maya Embedded Language – MEL*. Porém, não há descrição a respeito dos métodos de programação das máquinas, apenas o panorama básico do processo de fixação de um tijolo no outro por meio da aplicação de cola adesiva, também de maneira automatizada. Os protótipos se destacam visualmente, apresentando paredes curvas com as texturas dos tijolos conformando um movimento sequenciado de rotação (Fig. 5). No entanto, deixam a entender que, na época, faziam parte de um trabalho ainda em desenvolvimento, sobretudo do ponto de vista da otimização do tempo de execução, e não apresentam uma solução de estanqueidade da parede.

Figura 5 – “*The Informed Wall*”



2006. Crédito da imagem: Fabio Gramazio e Matthias Kohler.

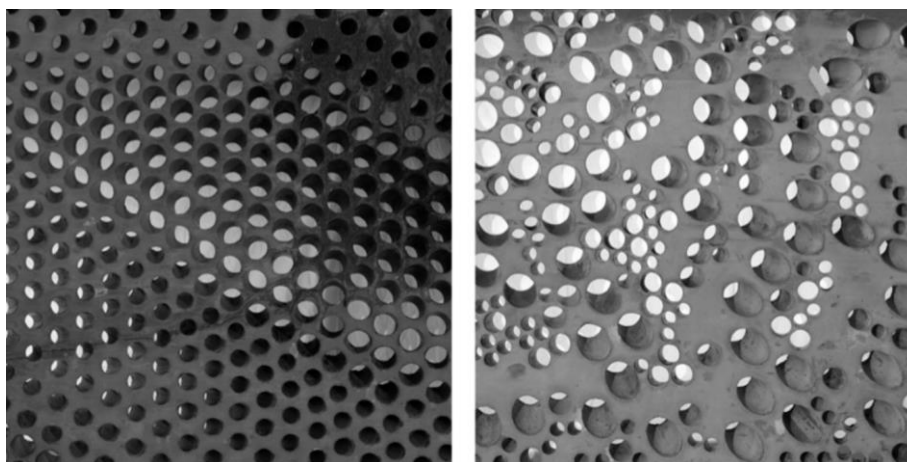
Em outro experimento, Bonwetsch [et al.] expuseram a necessidade de “incorporar a lógica de fabricação no processo de projeto de forma a se beneficiar ao máximo do potencial das técnicas de fabricação digital.”²¹ (BONWETSCH, 2007, p. 793, tradução nossa). Os autores apresentaram mais pesquisas realizadas

²¹ Original: “[...] to incorporate the fabrication logic into the design process in order to fully benefit from the potential of digital fabrication techniques.” (BONWETSCH [et al.], 2007, p. 793).

juntamente aos estudantes da *ETH* Zurique, objetivando a integração entre fabricação digital e processo de projeto. No entanto, a ênfase dada neste segundo artigo foi em processos subtrativos de fabricação, com a orientação de fresar perfurações em uma superfície. Em primeiro lugar, os autores explicitaram o uso do *software Maya*® para utilização nos projetos, mas devido a certas dificuldades na modelagem ponto a ponto de geometrias muito complexas, necessitaram utilizar as interfaces de programação por códigos em linguagem escrita: *Python*®, *C++*®, *OpenGL/GLU*®, *GPC*® e *QHULL*®. Com relação aos procedimentos de fabricação, foi utilizado um robô industrial de seis eixos equipado com fresa para processar placas de poliestireno expandido – *EPS* e chapas de madeira que, em conjunto com tubos plásticos, configuraram moldes para produção de placas de concreto. Para a conversão da informação dos projetos para a programação do braço robótico, descreveu-se apenas que foi utilizada a linguagem *Python*® em conjunto com sistemas analógicos de informação, como imagens, além de sistemas dinâmicos baseados em regras. Certamente, os processos de programação do maquinário robótico são muito complexos para descrição em um artigo acadêmico, logo, não foram aprofundados.

Os resultados encontrados por Bonwetsch [et al.] (2007) foram paredes perfuradas a partir da utilização direta da informação digital dos projetos, modelados ponto a ponto e programados por código escrito, para controle do maquinário robótico. Intitulou-se “*Tilted Holes*” o projeto de paredes cujas inúmeras perfurações não-lineares são todas diferentes entre si (Fig. 6).

Figura 6 – Experimento realizado no *ETH* Zurique, intitulado “*Tilted Holes*”.



2007. Crédito da imagem: Fabio Gramazio e Matthias Kohler.

Partindo-se de regras básicas iniciais, explorou-se diversas opções de perfurações por meio de técnicas de parametrização, para posterior conversão em informação para programação do maquinário CNC. Nesse sentido, os autores apresentaram uma crítica às limitações dos *softwares CAD* standardizados, expressando, por outro lado, a capacidade de personalização do projeto pela utilização de técnicas mais avançadas. Objetivaram viabilizar o processamento de uma grande quantidade de informação para projeto e construção de elementos arquitetônicos, que os *softwares CAD* comuns não possibilitam.

Um descontento com o conjunto standard de ferramentas de *softwares CAD* comuns em arquitetura resulta na necessidade de os arquitetos projetarem seus próprios *softwares* adequados para suas próprias necessidades. Especialmente quando da aplicação da lógica de fabricação digital não standardizada (e.g. lidando com e informando uma grande quantidade de elementos) o *software* standard se prova insuficiente²² (BONWETSCH [et al.], 2007, p. 798, tradução nossa).

Em “*Towards Digital Materiality*”, Gramazio e Kohler (2008) apresentaram uma seleção de projetos realizados, incluindo os dois experimentos descritos anteriormente. Afirmaram o caráter empírico das pesquisas que desenvolvem no *ETH* Zurique, por meio da construção efetiva de espaços, instalações, objetos e protótipos, trazendo a ideia de uma “materialidade digital” aplicada à arquitetura, ou seja, o processamento de materiais construtivos pelas técnicas computacionais. Porém, não desprezaram os métodos de produção dos trabalhos, valorizando a publicação dos vários experimentos concluídos até o período.

Em mais um experimento do grupo suíço, Volker Helm [et al.] (2012) abordaram a interação do maquinário robótico com operários em canteiros de obra reais, abrindo, assim, um campo extenso de pesquisa a respeito da viabilidade econômica deste tipo de aplicação. Trouxeram um apanhado de referências sobre processos construtivos robóticos, ainda na década de 1990, para a construção em tijolos, evidenciando trabalhos antecessores, mas apresentando críticas sobre os custos elevados e as dificuldades de operação e movimentação do maquinário. Neste experimento, o braço

²² Original: “A discontent with the standard tools set of common CAD softwares in architecture results in the necessity for architects to design their own software tools tailored to their specific needs. Especially when applying the logic of non-standardized digital fabrication (e.g. handling and informing a large amount of elements) standard software proves to be insufficient.” (BONWETSCH [et al.], 2007, p. 798).

robótico foi equipado com uma série de aparatos para auxiliá-lo a cumprir as operações dentro do canteiro (Fig. 7).

Figura 7 – Experimento de construção robótica em canteiro de obras.



2012. Crédito da imagem: Volker Helm [et al.].

Primeiro, o braço robótico *ABB IRB 4600* foi montado sobre uma plataforma móvel; segundo, foi equipado com uma bomba de sucção para operar a pinça à vácuo que pega os elementos a serem construídos, no caso, blocos de madeira; terceiro, foi equipado com sensores para reconhecimento de obstáculos que possibilitariam ao braço robótico se movimentar obedecendo as alturas e barreiras do espaço de trabalho; quarto, foi equipado com *scanner* 2D para medir as tolerâncias entre as medidas do projeto presente no computador e as medidas verdadeiras dos elementos da construção; quinto, foi equipado com *scanner* 3D para reconhecimento e interação com movimentos dos próprios colaboradores humanos. Todos os equipamentos necessitaram de etapas de programação do maquinário que não foram descritas no artigo, mas que se supõe terem sido exaustivas e bastante complexas. Todavia, considera-se um esforço fundamental para a viabilização de um problema que persiste na utilização dos robôs na construção real, que é a sua própria presença no canteiro de obras, exigindo a adaptação de uma série de outros elementos eletrônicos que possibilitaram ao braço robótico atuar de maneira mais próxima ao operário humano.

Em outro experimento dos pesquisadores do *ETH* Zurique junto aos estudantes de arquitetura do instituto, enfatizou-se a utilização de *softwares* personalizados para

adaptar os processos robóticos a situações específicas - quem sabe, preenchendo, assim, a lacuna deixada pelo experimento descrito anteriormente. Jason Lim, Fabio Gramazio e Matthias Kohler (2013) descreveram o processo de criação de um kit de ferramentas para programação gráfica do robô, codificado via *Python*®, mas para ser utilizado no *Grasshopper*®. A intenção foi testar a aplicação da construção robotizada em larga escala, utilizando o edifício em altura como objeto de estudo, dentro do ateliê de projeto, e o *Grasshopper*® foi deliberadamente escolhido por dois motivos básicos:

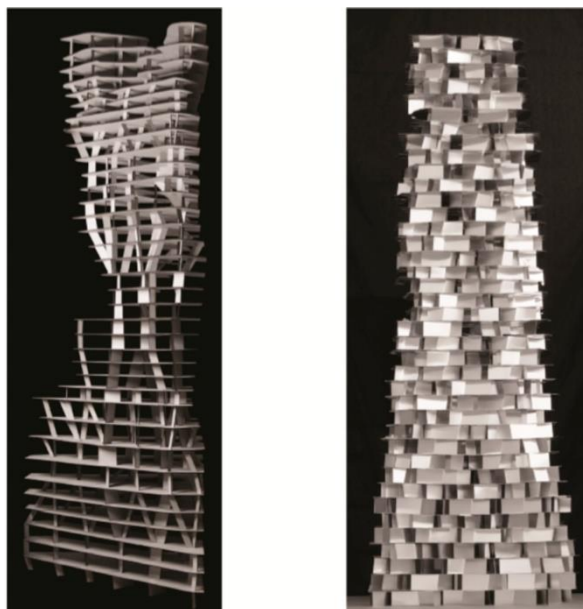
[...] primeiramente muitos estudantes não detinham experiência anterior sobre programação e não estavam familiarizados com abordagens algorítmicas de projeto, e em segundo lugar esperava-se que a configuração física de fabricação seria frequentemente modificada pelos estudantes ao longo do curso de projeto. Aqui, a programação visual e a natureza paramétrica do *Grasshopper* eram vantagens. A lógica algorítmica pode ser implementada de uma maneira visual pela conexão de componentes; isto é acessível a não programadores pois não requer código escrito²³ (LIM; GRAMAZIO; KOHLER, 2013, p. 47, tradução nossa).

Ainda sobre esse experimento de aplicação de *softwares* personalizados para programação de robôs, os autores compararam as funcionalidades do aplicativo criado, intitulado “*Your*”, com o *KUKA/prc*® e o *HAL*®, afirmando as contribuições em relação a esses aplicativos já existentes, principalmente a possibilidade de modificação do aplicativo pelo usuário final. Primeiro, o curso de projeto de edifícios em altura resultou em definições *Grasshopper*®, contendo informações tanto de desenho quanto de produção, que, de maneira geral, compuseram quatro etapas: informação de desenho, informação de fabricação física, instruções de movimento do robô e instruções de controle do robô. Segundo, resultou, também, em maquetes palpáveis de edifícios, cujas partes foram cortadas a laser, tais como modelos de paredes e de lajes, e, posteriormente, foram montadas entre si roboticamente (Fig. 8). Por último, resultou no desenvolvimento do próprio aplicativo durante a interação com os estudantes, uma vez que novos componentes foram criados e, conseqüentemente, um acréscimo de operações automatizadas para facilitar ainda mais sua manipulação pelo usuário. Considera-se a contribuição do artigo para o desenvolvimento das

²³ Original: “[...] firstly many students did not have prior programming experience and were unfamiliar with algorithmic approaches to design, and secondly the physical fabrication setup was expected to be frequently modified by students over the course of the studio. Here the visual programming and parametric nature of *Grasshopper* are advantages. Algorithmic logics can be implemented in a visual way by connecting components; this is accessible to non-programmers as it does not require writing code.” (LIM; GRAMAZIO; KOHLER, 2013, p. 47).

práticas de parametrização associadas ao projeto arquitetônico e demonstrando, assim, a conexão direta ao controle dos robôs, ou do maquinário CNC.

Figura 8 – Maquetes palpáveis de experimento de aplicação da fabricação robótica para construções em larga escala.



2013. Crédito da imagem: Jason Lim, Fabio Gramazio e Matthias Kohler.

Em mais um experimento do grupo de investigação suíço, técnicas de moldagem de concreto foram exploradas pela utilização da fabricação robótica. A partir de um breve histórico a respeito da técnica de moldagem estática, presente em exemplos modernos de arquitetura, como Pier Luigi Nervi, Félix Candela etc., Ena Lloret Kristensen [et al.] (2013) apresentaram um breve panorama a respeito de abordagens inovadoras de moldagem, onde além dos produtores europeus Peri e Adapa, citam uma iniciativa própria do *ETH* Zurique, intitulada “*TailorCrete*”. Posteriormente, o artigo concentrou o estudo sobre sistemas de moldagem dinâmica em conjunto com a fabricação digital, enfatizando a técnica de *slipforming*, ou molde deslizante. Descreveu-se um histórico resumido da técnica para se apontar os principais problemas, com relação às limitações formais e dificuldades operativas do maquinário mecanizado. Ao juntar de molde deslizante à fabricação digital Lloret Kristensen [et al.] (2013) introduziram inovação tecnológica para alcançar maior complexidade formal pelo deslocamento não retilíneo do molde deslizante, de maneira a criar elementos curvos de concreto (Fig. 9). Os experimentos realizados auxiliaram

determinar a melhor velocidade de deslizamento e, a partir desse ponto, os autores sugeriram novas linhas de investigação para alcance de maior complexidade formal.

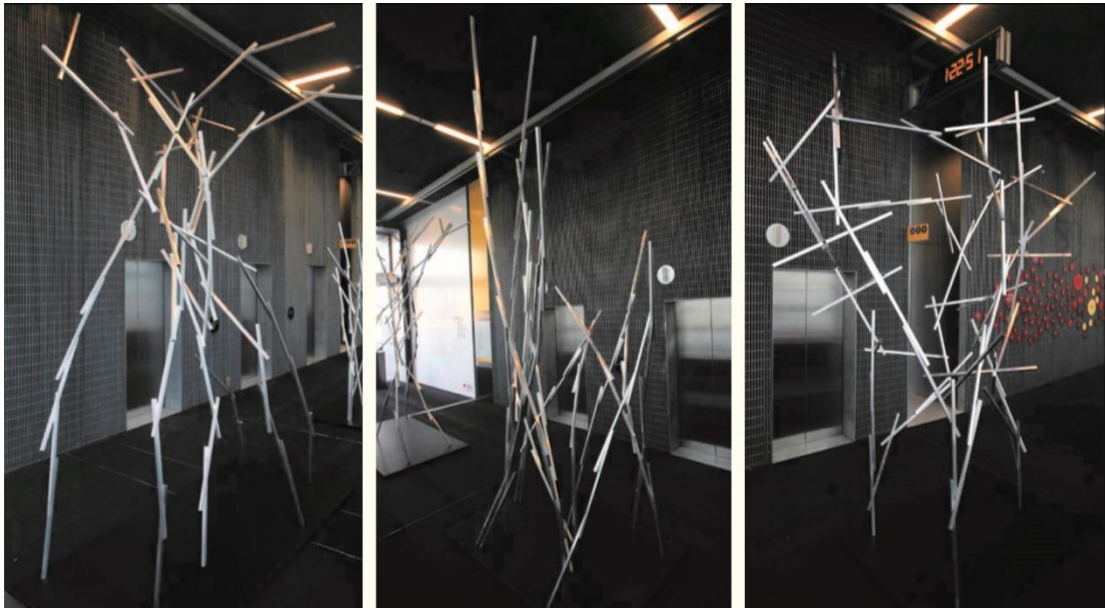
Figura 9 – Técnica de molde deslizante controlado roboticamente para fabricação de concreto.



2013. Crédito da imagem: Ena Lloret Kristensen [et al.].

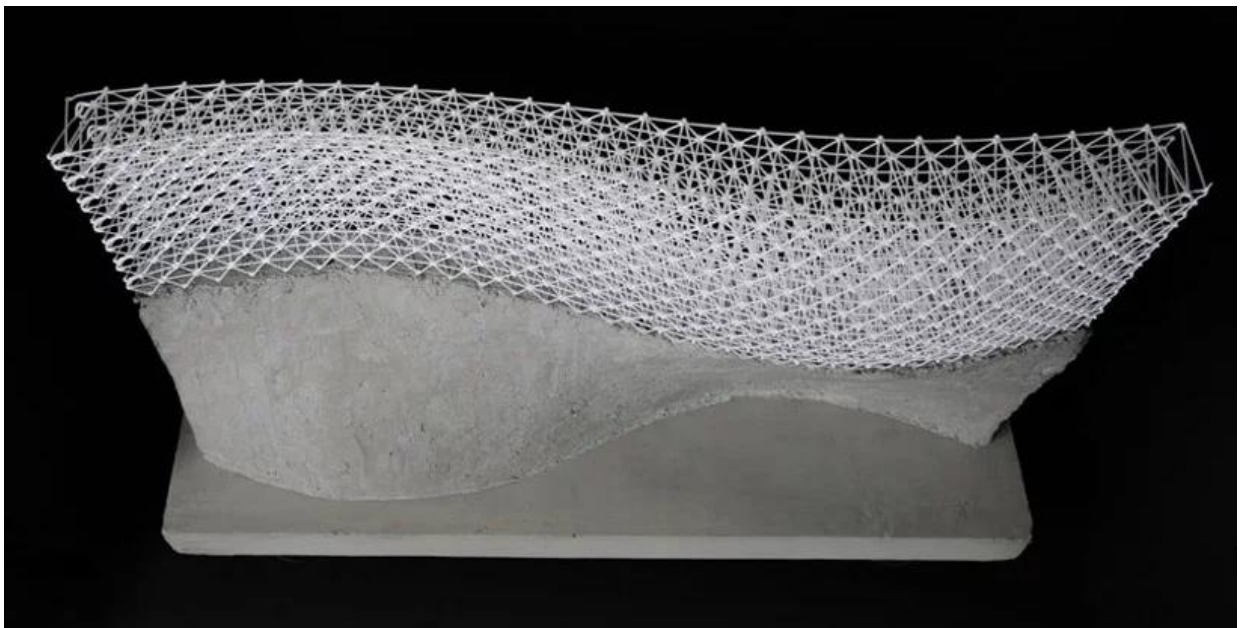
Em um novo experimento, o grupo suíço lançou o desafio de fabricar estruturas metálicas leves, quem sabe, vislumbrando a possível fabricação robótica das armações em aço internas aos elementos em concreto investigados no experimento descrito anteriormente. Jason Lim [et al.] (2014) apresentaram os resultados de um *workshop* realizado no *Royal Melbourne Institute of Technology – RMIT* que, em síntese, investigou um processo de construção de componentes metálicos, com interação manual do colaborador humano, voltado para um público sem experiências aprofundadas sobre programação e robótica. No caso desse experimento, utilizou-se de barras de alumínio com perfil tubular retangular para fabricar arranjos espaciais complexos, conectando as barras entre si de maneira não linear. Os participantes receberam ferramentas pré-programadas em *Python®* para a modelagem algorítmica em *Grasshopper®* de seus projetos, de tal maneira a facilitar o trabalho de conversão para o código *KUKA Robot Language – KRL* de controle do robô. Durante o período do *workshop*, utilizou-se um braço robótico *KUKA KR150*, equipado com uma pinça pneumática com dois dedos, que ajudou nas operações de conexão das barras. Ao final, diversas estruturas foram montadas com sucesso (Fig. 10), demonstrando variabilidade formal das soluções e, sobretudo, o potencial de facilitar o trabalho do usuário por meio de componentes *Grasshopper®* pré-programados que orientaram as condições de projeto, tendo em vista as restrições de movimentação do maquinário.

Figura 10 – Experimento de conexão de barras de alumínio por controle robótico.



2014. Crédito da imagem: Jason Lim [et al.].

Figura 11 – Experimento de construção robótica de estrutura metálica para concreto armado, intitulado “*Mesh Mould*”.



2014. Crédito da imagem: Norman Hack [et al.].

A partir de um último experimento do grupo suíço a ser analisado aqui, Norman Hack [et al.] (2014) publicaram o projeto intitulado “*Mesh Mould*” (Fig. 11) que, de certa forma, sintetizou os experimentos anteriores sobre o processamento robótico do concreto armado, ao unir, em um mesmo processo de fabricação, a moldagem e a

execução da armação metálica. Os autores apresentaram técnica inovadora para construção de paredes de concreto armado em dupla curvatura, onde boa parte do processo é artesanal, deixando à fabricação robótica a etapa de execução da armadura metálica que requer maior precisão. Uma série de testes foram realizados para verificar os métodos de deposição do concreto, a partir da análise dos tipos e densidades das malhas de armação produzidas, a princípio, em plástico.

Uma primeira compilação de trabalhos do grupo da *ETH* Zurique foi publicada apresentando os principais resultados produzidos ao longo de praticamente uma década (GRAMAZIO; KOHLER, 2014). A publicação ofereceu um panorama de soluções para a construção de formas complexas por meio das tecnologias avançadas, focalizando-se em elementos básicos da arquitetura, como paredes de tijolos, elementos em concreto, elementos acústicos etc. O grupo recriou técnicas comuns da construção civil ao utilizar métodos robóticos de fabricação, execução e montagem.

No *ETH* Zurique a utilização da robótica em arquitetura é bastante voltada para o desenvolvimento dos processos mais básicos da construção civil. O tijolo, o concreto armado, que inclui a deposição da massa e a armação metálica, e produtos mais específicos, como os tijolos acústicos ou as placas de revestimento. Um tipo de produção/pesquisa centrada em problemas reais dos processos construtivos, considerando as circunstâncias de tais processos e como desafiá-las a assumirem uma performance superior, mais avançada. No caso, o que possibilitou alcançar a não standardização da construção foi a robótica, por sua capacidade de trabalhar com diferentes materiais, utilizando instrumental diversificado.

As aplicações do grupo da cadeira de *Architecture and Digital Fabrication* indicaram soluções para problemas que estão vinculados aos sistemas construtivos já existentes na indústria da construção, tratando-os por meio de tecnologias avançadas. Propõe-se com isso a requalificação profissional, a partir de um novo modelo de organização do processo construtivo que racionaliza o trabalho artesanal a partir do maquinário.

Percebe-se também a evolução rápida dos meios de produção, principalmente com relação ao campo dos *softwares*, entre 2006 e 2014. A análise dos artigos publicados no período referido comprova que no trabalho precursor do grupo suíço, anterior às interfaces de programação gráfica, a programação do maquinário se dava,

em geral, via *Python*®, ou seja, por códigos em linguagem escrita, e que o principal *software* de modelagem tridimensional era o *Maya*®, utilizado nos primeiros experimentos, em conjunto com a sua interface integrada de programação *MEL*. Apenas posteriormente, incorporou-se a interface de programação gráfica *Grasshopper*®, tornando os processos de programação mais acessíveis à maior parte dos usuários leigos.

Ainda, percebe-se nas publicações anteriormente descritas que os próprios métodos de utilização da robótica evoluíram ao longo de quase uma década de experiência. Por exemplo, o primeiro experimento com o concreto, utilizando perfurações, ainda um tanto rudimentar quando comparado ao experimento “*Mesh Mould*” que desvelou um potencial de fabricação mais avançado e que alcançou um nível maior de especialização ao incluir a fabricação da armação em aço.

1.1.2.1.3 – Aplicações da robótica em arquitetura na segunda década do século XXI europeu

Em março do ano de 2013 tomei conhecimento da divulgação do pavilhão de pesquisa fabricado roboticamente em fibras de carbono e vidro pelo *Institute for Computational Design – ICD* em conjunto com o *Institute of Building Structures and Structural Design – ITKE* da Universidade de Stuttgart. Em pesquisas mais recentes percebeu-se que os experimentos já vinham sendo realizados desde antes de 2010, sendo que a primeira publicação encontrada data de 2011 com “*Integrative Design Computation*” do professor e arquiteto Achim Menges que, neste momento, atuava como professor visitante na Universidade Harvard, EUA (MENGENS, 2011).

Na publicação mencionada, Menges (2011) propôs uma abordagem computacional das propriedades físicas da madeira, integrando a sua elasticidade de torção e performance de carga por meio da modelagem algorítmica e fabricação robótica. O argumento é de que é possível simular o comportamento do material pela utilização de processos generativos de projeto e, a partir daí, criar sistemas performáticos de materiais arquitetônicos. Para tanto, e partindo de uma compreensão físico-biológica da madeira e seu desempenho estrutural, o autor se fundamentou em três projetos de pesquisa experimentais que resultaram em protótipos estruturais em escala real.

O primeiro deles foi um sistema estrutural em malha, feito em madeira de carvalho curvada depois de processo de vaporização quente, produzido em 2009 por grupo de investigadores de Harvard (Fig. 12). O autor explicou brevemente tal processo de vaporização, já muito utilizado na construção civil, mas não detalhou as técnicas digitais utilizadas para se alcançar as inúmeras variações de curvatura dos elementos em madeira.

Figura 12 – Estrutura em malha de madeira curvada após processo de vaporização quente.



2011. Crédito da imagem: Achim Menges.

Figura 13 – Estrutura hiperboloide fabricada roboticamente por sistema de sulcagem.



2011. Crédito da imagem: Achim Menges.

O segundo projeto de pesquisa apresentado foi realizado em 2010, também por investigadores de Harvard, e teve por objetivo construir uma estrutura hiperboloide por meio de sulcos roboticamente fabricados em elementos de madeira de carvalho (Fig. 13). Uma ferramenta de projeto computacional foi desenvolvida para sistematizar variações de frequência, angulação, profundidade e comprimento, de tal forma a se

alcançar curvaturas e torções diferentes. Tal ferramenta atuou de maneira integrada ao controle do maquinário, possibilitando a precisão milimétrica de fabricação por braço robótico equipado com serra circular. No entanto, os métodos utilizados não foram descritos no estudo, deixando em aberto a maneira como ocorreram os processos de programação e fabricação.

O terceiro e último projeto de pesquisa apresentado na publicação referida anteriormente foi realizado no *ICD/ITKE* de Stuttgart, em 2010, por meio de projeto e engenharia computacional, em conjunto com a fabricação robótica, e resultou em uma estrutura de torção-ativa feita por placas de madeira compensada de bétula e testada em um pavilhão protótipo em escala real (Fig. 14). O princípio básico foi de criar zonas intercaladas de tensão e torção elástica pela disposição de tiras finas de madeira compensada, encaixadas uma ao lado das outras, criando, assim, uma espécie de estrutura em concha. Para tanto, uma ferramenta de projeto computacional foi desenvolvida com seis mil e quatrocentas linhas de código, que automaticamente gerou dados tanto para a simulação estrutural por método de elementos finitos²⁴, quanto para a fabricação robótica. Após a montagem por conexão de quinhentas tiras geometricamente únicas, o pavilhão foi digitalizado por *scanner* 3D, de tal forma que se pôde comparar a geometria projetada daquela executada no local, percebendo-se divergências mínimas.

Figura 14 – Pavilhão fabricado roboticamente em sistema estrutural de torção-ativa.



2011. Crédito da imagem: Achim Menges.

²⁴ Processo comumente utilizado para resolução de problemas de engenharia e matemática, em geral, aplicado às áreas de análise estrutural, transferência de calor, movimento de fluidos. Para uma compreensão introdutória a respeito do tema ver Daryl L. Logan (2011).

Em um outro experimento arquitetônico, o grupo de pesquisa da Universidade de Stuttgart apresentou estudo de fabricação de chapas de madeira por braço robótico para sistema de encaixe *finger-joint* tridimensional. O experimento trouxe uma abordagem biomimética de projeto arquitetônico a partir do conceito de morfologia performativa que “denota a capacidade de um sistema material natural ou artificial de se ajustar especificamente às condições extrínsecas e intrínsecas do sistema por meio da diferenciação morfológica”²⁵ (HENSEL; MENGES, 2008, p. 6, tradução nossa).

No artigo que apresentou o experimento mencionado no parágrafo anterior, Oliver David Krieg [et al.] (2011) descreveram os processos de diferenciação morfológica que ocorrem, por exemplo, em ouriços marinhos para fundamentar os procedimentos projetivos que integram a parametrização e a fabricação robótica para estruturas em placas de madeira. Os autores afirmaram que a produção de encaixes com diferentes angulações só seria viável pela utilização de tecnologias digitais mais avançadas que as máquinas CNC de três eixos, uma vez que o braço robótico utilizado permitiu seis eixos de movimentação (Fig. 15). Apesar do artigo ter relatado um catálogo de operações biomiméticas a serem simuladas no projeto das placas de madeira, não houve uma descrição da transposição de tais operações em termos de programação de *software* e codificação do robô.

Figura 15 – Sistema de encaixe *finger-joint* roboticamente fabricado em placas de madeira.

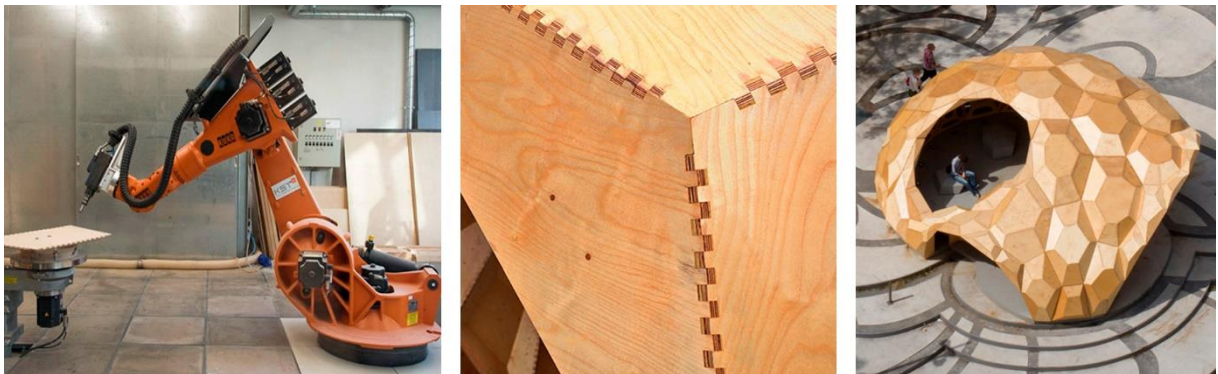


2011. Crédito da imagem: Oliver David Krieg [et al.].

²⁵ Original: “*Performative morphology denotes the capacity of a natural or artificial material system to adjust specifically to system-external and system-internal conditions through morphological differentiation.*” (HENSEL; MENGES, 2008, p. 6).

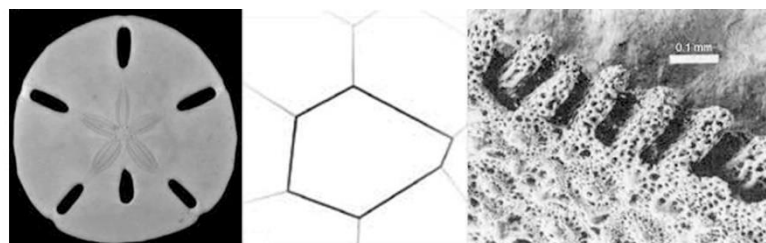
Em mais um projeto de pesquisa experimental do grupo alemão, Tobias Schwinn [et al.] (2012a) concentraram-se em estratégias biomiméticas de projeto para fabricação robotizada de placas de madeira compensada. Se no artigo anteriormente descrito apresentou-se o protótipo experimental dos encaixes *finger-joint*, neste artigo, grupo semelhante de pesquisa de Stuttgart, relatou o processo de produção do pavilhão completo (Fig. 16), utilizando a mesma tecnologia apresentada anteriormente, mas abordando um processo mais amplo e detalhado, que considerou as dificuldades e procedimentos durante toda a execução. Com relação às estratégias projetivas fundamentou-se na compreensão físico-biológica da *Clypeasteroidea*, ou bolacha-da-praia, que apresentam um esqueleto rígido de placas hexagonais que se conectam entre si por estruturas microscópicas que se assemelham a encaixes *finger-joint* (Fig. 17).

Figura 16 – Pavilhão fabricado roboticamente em estrutura de placas de madeira encaixadas entre si por sistema *finger-joint*.



2012. Crédito da imagem: Tobias Schwinn [et al.].

Figura 17 – Estratégia biomimética de projeto a partir da análise microscópica do esqueleto rígido da *Clypeasteroidea*, ou bolacha-da-praia.



2012. Crédito da imagem: Tobias Schwinn [et al.].

Ainda em Schwinn [et al.] (2012a), deve se apontar a descrição detalhada tanto dos processos de projeto quanto dos processos de fabricação. Com relação ao projeto, considerou-se as restrições geométricas das angulações de corte das placas

de madeira compensada por parte do braço robótico e, também, a otimização dos parâmetros de fabricação, apesar de não mencionar os *softwares* utilizados. Com relação à fabricação robótica, foi considerado um modelo de informação digital para controle do maquinário que não foi gerado por modelos tridimensionais digitais das geometrias das peças, mas por “ ‘leves’ objetos de dados proxy cada um consistindo de malha *NURBS* planar poligonal, tipo de material e espessura em forma alfanumérica, e sua informação de fabricação específica como uma nuvem de pontos tridimensional com arquivo de dados de fabricação associado”²⁶ (SCHWINN [et al.], 2012a, p. 163, tradução nossa). Além disso, foram consideradas diversas operações de fabricação, desde a geração dos vetores de movimentação do robô, conversão para código CNC, geração de código do braço robótico, até uma breve descrição da construção e montagem do próprio pavilhão. Por último, e à semelhança do que ocorreu com o pavilhão anteriormente descrito, houve um processo de digitalização do objeto construído para comparação das diferenças geométricas em relação ao modelo digital projetado.

Em um artigo relacionado ao pavilhão em estrutura de placas de madeira descrito anteriormente, Oliver David Krieg [et al.] (2012) enfatizaram os procedimentos metodológicos do projeto arquitetônico e detalham suas características geométricas, estruturais e de fabricação, que biomimetizam a natureza da bolacha-da-praia. Afirmaram que:

A metodologia descrita não apenas sugere o desenvolvimento de uma ferramenta de projeto computacional como parte de um “encadeamento digital”, mas também o planejamento de um processo de projeto: pelo fomento da colaboração e compartilhamento de informação entre arquitetos e engenheiros na forma de um modelo de informação computacional compreensivo que engloba e preserva tanto a validade de princípios biomiméticos inicialmente identificados quanto requerimentos de fabricação; e por possibilitar ao arquiteto acomodar características programáticas, ambientais e contextuais, específicas do projeto²⁷ (KRIEG [et al.], 2012, p. 522, tradução nossa).

²⁶ Original: “[...] the digital information model consists of [...] ‘lightweight’ proxy data objects each consisting of a polygonal planar *NURBS* patch, material type and thickness in alphanumerical form, and its specific fabrication information as a three-dimensional point cloud with an associated fabrication data file.” (SCHWINN [et al.], 2012a, p. 163).

²⁷ Original: “The described methodology not only suggests the development of a computational design tool as part of a ‘digital chain’, but also the design of a design process: by fostering collaboration and sharing of information between architects and engineers in the form of a comprehensive computational information model that encapsulates and preserves the validity of the initially identified biomimetic principles and fabrication requirements; and by enabling the architect to accommodate project specific programmatic, environmental, and context-related characteristics.” (KRIEG [et al.], 2012, p. 522).

Outros experimentos, que aprofundaram ainda mais a investigação da fabricação robótica de estruturas em placas de madeira compensada, foram desenvolvidos pelos investigadores dos institutos *ICD/ITKE* da Universidade de Stuttgart (SCHWINN [et al.], 2012b) (KRIEG; MENGES, 2013) (SCHWINN [et al.], 2014), demonstrando o nível de expertise alcançado dentro deste campo de pesquisa, por esta universidade.

Em 2012 o grupo de pesquisadores do *ICD* projetou e executou um pavilhão de pesquisa em fibra de vidro e carbono, abrindo, assim, mais um campo de investigação, com uma sequência de pavilhões utilizando os mesmos materiais no decorrer dos anos seguintes. Jakob Weigele [et al.] (2013) apresentaram o estudo sobre o pavilhão construído roboticamente pelo entrelaçamento de filamentos plásticos reforçados com resina, envolvendo a análise biomimética do exoesqueleto de artrópodes. Os autores introduziram uma teoria de aplicação de princípios da natureza na arquitetura e propuseram uma prática de transposição de tais princípios para fabricação, construção e montagem, ao afirmarem que:

[...] o atual contexto tecnológico e econômico com seu acesso amplo a computadores e algoritmos poderosos possibilita a simulação sofisticada das propriedades dos materiais por um lado, mas, por meio da fabricação digital, também possibilita a prototipagem física que era anteriormente exclusiva para a produção industrial²⁸ (WEIGELE [et al.], 2013, p. 550, tradução nossa).

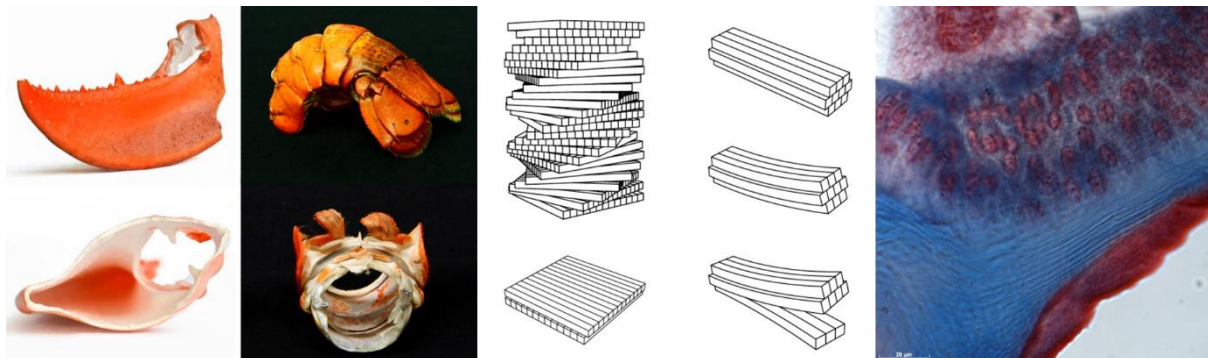
Com o acesso às tecnologias avançadas, a experimentação de determinadas estruturas complexas torna-se viável tanto do ponto de vista do projeto, que requer um maior processamento de informação técnica em formato de programação para controle do maquinário, quanto da fabricação, que, a partir daí, necessita de máquinas mais avançadas, capazes de lidar com tal complexidade. Entende-se, portanto, que há uma crença na tendência de tornar tal maquinário economicamente viável para a produção em menor escala.

Weigele [et al.] (2013) abordaram a construção em reforço de fibras de maneira inovadora e independente de sistema de moldes para ser executada, utilizando-se apenas do movimento de entrelaçamento que o braço robótico executa. A complexidade dos movimentos do robô resultou do processo de transferência

²⁸ Original: “[...] today’s technological and economical context with its ubiquitous access to powerful computers and algorithms enables sophisticated simulations of material properties on the one hand, but, through the means of digital fabrication, also enables physical prototyping that was once exclusive to the manufacturing industry.” (WEIGELE [et al.], 2013, p. 550).

biomimética decorrente da análise das microestruturas em fibras de quitina que compõem o exoesqueleto de uma espécie de lagosta (Fig. 18).

Figura 18 – Análise microscópica do exoesqueleto de espécie de lagosta.



2013. Crédito da imagem: Jakob Weigele [et al.].

A transposição construtiva ocorreu pela compreensão das diversas camadas que formam as carapaças protetoras das entranhas do animal, desde a exocutícula mais dura e resistente até a endocutícula mais macia e flexível, ambas constituídas por microfibras de quitina em diferentes densidades. Para tanto, os investigadores alemães criaram um conjunto de ferramentas e procedimentos computacionais que integraram parametricamente a modelagem de geometrias, a análise estrutural e a personalização de protocolos de fabricação, para um sistema de entrelaçamento de fibras de carbono e de vidro reforçadas com resina plástica. Perfis em madeira estabeleceram os pontos de amarração dos filamentos, gerando, assim, superfícies hiperboloides em cinco camadas diferentes que criam áreas de maior ou menor resistência na medida em que se cruzaram. O cruzamento dos filamentos gera forças de tensão que deformam suas respectivas geometrias, logo, uma simulação virtual foi criada para que se pudesse prever as deformações do entrelaçamento antes de sua execução. No entanto, de acordo com Weigele [et al.] (2013), a avaliação do comportamento estrutural de tais forças de tensão atuando sobre as camadas de superfícies só foi possível pelo ciclo automático de informação parametrizada entre o modelo geométrico e a análise estrutural por elementos finitos, o que, consequentemente, otimizou a forma final do entrelaçamento.

A etapa final de execução robotizada processou todas as informações digitalmente concebidas, utilizando um braço robótico que realizou as operações em conjunto com uma mesa giratória onde foi posicionada uma estrutura metálica que recebeu os perfis em madeira para amarração dos filamentos. Uma vez que as fibras

foram banhadas em resina plástica durante o entrelaçamento, foi possível remover a estrutura metálica após a cura do material, restando apenas a estrutura composta exclusivamente de fibras de vidro e carbono (Fig. 19), que venceu um vão de oito metros, com três metros e cinquenta centímetros de altura, trezentos e vinte quilos de peso final e uma espessura média de quatro milímetros. Ao final do artigo, os próprios autores ressaltaram que “apesar do protótipo construído não tratar de certos aspectos do ‘mundo real’ como conforto térmico ou proteção contra intempéries, pesquisas posteriores começarão a tratar de aspectos da estanqueidade do edifício [...]”²⁹ (WEIGELE [et al.], 2013, p. 558, tradução nossa).

Figura 19 – Processo de fabricação robotizada para pavilhão com estrutura de fibras resinadas.



2013. Crédito da imagem: Jakob Weigele [et al.].

Posteriormente, Leyla Yunis [et al.] (2014) publicaram um estudo do pavilhão de pesquisa 2013 do *ICD/ITKE*, que utilizou técnica de fabricação robótica por entrelaçamento de um filamento plástico oco. O estudo envolveu pesquisa de biomimética sobre oito espécies de besouro voadores com exoesqueleto fibroso. Os pesquisadores que produziram o pavilhão contaram com a participação de equipe multidisciplinar, em conjunto com equipe de biólogos da Universidade de Tübingen, Alemanha. As referências do projeto foram os trabalhos “*Silk Pavilion*” do *Mediated Matter Group*, dirigido por Neri Oxman, no *MIT* (OXMAN [et al.], 2013) (OXMAN [et al.], 2014), e *Flectofin*, sistema de sombreamento biomimético produzido pelo *ITKE*, dirigido por Jan Knippers, na Universidade de Stuttgart (KNIPPERS; SPECK, 2012). Outra referência que poderia ser mencionada é o experimento realizado por Georg

²⁹ Original: “While the built prototype does not address certain ‘real-world’ aspects such as thermal comfort or weather proofing, further research will start to address aspects of building enclosure [...]” (WEIGELE [et al.], 2013, p. 558).

Ladurner [et al.] (2012) utilizando fibra de vidro e resina de poliéster para construção de estruturas biomiméticas do líquen, também realizado por pesquisadores dos institutos alemães mencionados.

A produção do pavilhão envolveu estratégias biomiméticas de projeto arquitetônico que investigaram as camadas protetoras das asas dos besouros, chamadas *elytra*, em busca do reconhecimento visual das suas respectivas trabéculas, microestruturas de tecido orgânico que a compõem, para fundamentar o estudo de estruturas feitas em fibra. (Fig. 20)

Figura 20 – A) *Elytron* de espécie de besouro; B) corte no *elytron*; C) trabéculas microscópicas de ossatura.



A) 2004. Crédito da imagem: Mario Sarto. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maybug.jpg>

B) 2014. Crédito da imagem: Leyla Yunis [et al.].

C) 2019. Crédito da imagem: *Laboratoires Sevier*.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spongy_bone_-_Trabecular_bone_-_Normal_trabecular_bone_-_Smart-Servier.png

Ainda sobre o estudo do pavilhão de pesquisa 2013 do *ICD/ITKE*, Yunis [et al.] (2014) consideraram a lógica de estruturas de trabéculas para fabricação a partir de fibras de carbono e de vidro entrelaçadas em sete camadas diferentes pela utilização de dois braços robóticos. A lógica de entrelaçamento resultou em componentes hiperboloides armados em estrutura metálica hexagonal e constituídos por linhas banhadas em resina epóxi, tensionadas e cruzadas entre si. Os autores não detalharam com profundidade os processos de projeto, programação e movimentação dos maquinários, esboçando como ocorreu a execução pela equipe de estudantes e pesquisadores das universidades alemãs anteriormente mencionadas. No entanto, fizeram o apontamento da maneira como ocorreu o processo de conversão da geometria projetada para a linguagem de programação do robô, no caso, *KRL*. Afirmaram que um algoritmo foi personalizado para cada etapa de fabricação de cada componente, além de algoritmos para ajustar a rotação e o posicionamento entre os

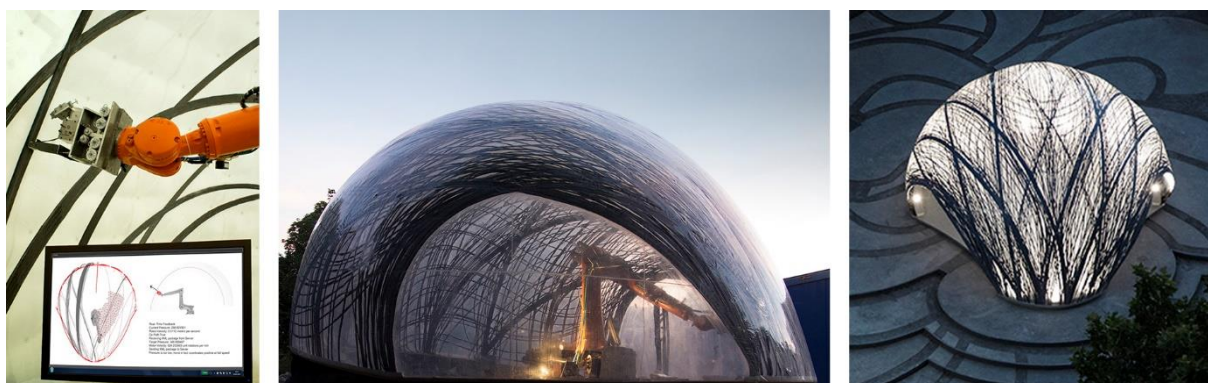
braços robóticos (YUNIS [et al.], 2014). O resultado foi uma cobertura em abóboda construída por elementos modulares com maior ou menor densidade de fibra, a depender de sua performance de carga dentro do conjunto estrutural (Fig. 21).

Figura 21 – Pavilhão de pesquisa em estrutura de fibras resinadas, fabricado roboticamente.



2014. Crédito da imagem: Leyla Yunis [et al.].

Figura 22 – Processo de fabricação robótica do pavilhão de pesquisa em estrutura de fibras resinadas, utilizando molde inflável.



2015. Crédito da imagem: Lauren Vasey [et al.].

Por meio da execução de mais um pavilhão construído por fibras de vidro e de carbono banhadas em resina, outro grupo de pesquisadores do *ICD/ITKE* apresentou uma metodologia inovadora de deposição destes materiais. Utilizando apenas um braço robótico, Lauren Vasey [et al.] (2015) entrelaçaram a superfície interna tensionada de uma estrutura inflável, fabricada em plástico etileno tetrafluoroetileno – *ETFE*, transformando-a gradualmente em uma estrutura em concha por compressão (Fig. 22). Devido ao problema da falta de precisão durante o processo de aderência das fibras à superfície inflável, que se deformou durante a execução, devido inclusive

ao peso do material aplicado, a fabricação contou com um sistema de sensores para calibrar as pequenas variações geométricas decorrentes. Além disso, o braço robótico foi equipado com um spray pressurizado para aplicação de cola à superfície da estrutura inflável antes da deposição das fibras. O projeto foi fundamentado em um estudo de biomimética sobre a maneira como uma espécie de aranha tece sua teia debaixo d'água, dentro de uma bolha de ar.

Ainda investigando construções por estruturas compostas por entrelaçamento de filamentos, Lauren Vasey [et al.] (2016) apresentaram de maneira detalhada o protocolo de construção de uma estrutura construída por pequenos módulos *tensegrity*, utilizando um processo de colaboração entre um braço robótico e um indivíduo que recebe instruções por meio de um *smartwatch*. As peças *tensegrity* foram produzidas utilizando pequenas hastes de bambu e entrelaçadas por filamento oco (Fig. 23).

Figura 23 – Colaboração máquina-humano para construção de módulos *tensegrity*.



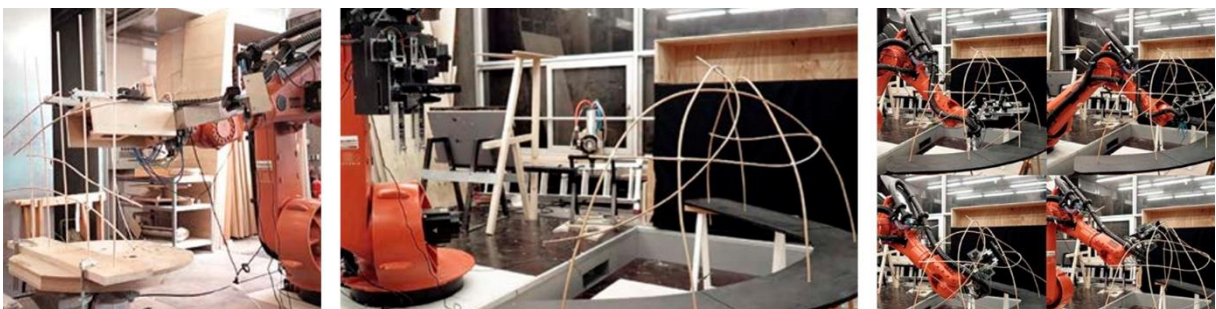
2016. Crédito da imagem: Lauren Vasey [et al.].

O estudo publicado explorou as dificuldades encontradas entre a movimentação de precisão dos seis eixos do braço robótico em relação à menor precisão do processo manual. Para contornar essas dificuldades o braço robótico foi equipado com uma câmera que possibilitou a análise comparativa de imagens, atualizando o sistema de movimentação em cada etapa, até como uma medida de segurança. O grupo de acadêmicos que apresenta o estudo contou com a participação de uma equipe interdisciplinar colaborativa de pesquisadores da *Autodesk*. Vasey [et al.] (2016) afirmaram que o processo de interação máquina-humano oferece vantagens durante a construção, uma vez que:

Apesar da fabricação robótica ter desafiado meios standardizados de produção para arquitetura e indústrias de construção, o conhecimento especializado e o conjunto de habilidades requeridas pelos robôs, e a organização e desenvolvimento de processos robóticos customizados, são desafios logísticos significantes que aumentam os custos, compartimentalizam a produção e as tarefas de montagem, e favorecem encadeamentos produtivos *file-to-factory* lineares³⁰ (VASEY [et al.], 2016, p. 185, tradução nossa).

Em mais um experimento do grupo de pesquisas alemão, Giulio Brugnaro [et al.] (2016) investigaram um processo de projeto e fabricação diferente do processo linear amparado por medidas e geometrias representadas em um meio de análise. A abordagem investigada, intitulada construção robótica baseada em comportamento, considerou uma troca de informação constante que evoluiu de acordo com as intenções de projeto, limitações de fabricação, critérios de performance, comportamento dos materiais e condições específicas do lugar, a partir da mimese do processo de construção dos ninhos do pássaro tecelão. Para tanto, houve a necessidade de implementação de um sistema de sensores que atuasse em tempo real juntamente com o robô, transferindo as informações geométricas captadas diretamente para seu controle. Devido à complexidade do processo de entrelaçamento de varetas de ratã o estudo demonstrou as dificuldades encontradas durante a fabricação, que simula um processo artesanal por meio do braço robótico. Os autores propuseram com isso uma reconsideração do maquinário dentro do campo da construção. Os resultados foram uma série de protótipos de pequena escala e um protótipo final de parte de uma estrutura entrelaçada maior (Fig. 24).

Figura 24 – Braço robótico em processo de construção baseado em comportamento.



2016. Crédito da imagem: Giulio Brugnaro [et al.].

³⁰ Original: “*Though robotic fabrication has challenged standardized means of production for the architecture and manufacturing industries, the specialized knowledge and skill set that robots require, and the organization and development of customizable robotic processes, are significant logistical challenges which increase costs, compartmentalize production and assembly tasks, and favor linear, file-to-factory production chains.*” (VASEY [et al.], 2016, p. 185).

No experimento, intitulado “*Robotic Sweing*”, de construção do pavilhão de pesquisa 2015 do *ICD/ITKE* de Stuttgart, Tobias Schwinn [et al.] (2016), de certa forma, sintetizaram as práticas anteriores das duas sequências de pavilhões já descritos, a primeira delas de pavilhões construídos em madeira e a segunda de pavilhões em estruturas reforçadas de fibras. Construído com chapas muito finas de madeira costuradas entre si por um braço robótico e uma máquina de costura industrial, o pavilhão foi constituído por um sistema construtivo leve (Fig. 25), fundamentado na análise de materiais anisotrópicos cujas características fibrosas apresentam desafios para as técnicas comuns de construção, como é o caso da madeira. A morfologia do pavilhão também foi concebida utilizando a biomimética, assim como os outros pavilhões projetados pelos pesquisadores dos institutos mencionados, criando, neste caso, uma comparação com as propriedades físicas de um tecido.

Figura 25 – Processo robotizado de costura de chapas finas de madeira para construção do pavilhão de pesquisa *ICD/ITKE* 2015.



2016. Crédito da imagem: Tobias Schwinn [et al.].

Schwinn [et al.]. (2016) afirmaram que tal sistema construtivo, brevemente descrito acima, não foi desenvolvido para proteger contra as intempéries, uma vez que apenas experimentou um sistema inovador de construção por pequenos módulos leves que se juntam entre si para a constituição de uma estrutura maior, sem resolução da estanqueidade da cobertura. Em trabalhos mais recentes, como “*IBA Timber Prototype House*” e “*BUGA Wood Pavilion 2019*”, os pesquisadores do *ICD/ITKE* já encontraram tais soluções (Fig. 26).

Figura 26 – À esquerda *IBA Timber Prototype House*, à direita *BUGA Wood Pavilion 2019*.



Esquerda – 2019. Crédito da imagem: Thomas Müller. <https://icd.uni-stuttgart.de/?p=25761>

Direita – 2019. Crédito da imagem: *ICD/ITKE University of Stuttgart*. <https://icd.uni-stuttgart.de/?p=22287>

Figura 27 – Pavilhão de pesquisa *ICD/ITKE 2016*, fabricado por dois braços robóticos e um drone.



2017. Crédito da imagem: Benjamin Felbrich [et al.].

Voltando à cronologia de experimentações do grupo alemão, após o pavilhão fabricado em chapas de madeira costuradas entre si, houve a publicação de um novo pavilhão construído em estrutura metálica reforçada em fibras de carbono e vidro. Conforme Benjamin Felbrich [et al.] (2017), o pavilhão de pesquisa *ICD/ITKE 2016* experimentou um processo de fabricação que incluiu dois braços robóticos auxiliados por um drone, para a produção de uma estrutura com um balanço de doze metros. A sua construção foi possível por meio do entrelaçamento de filamentos de fibra que sustentou o grande balanço por um sistema de tirantes tensionados (Fig. 27).

Os braços robóticos permaneceram fixados em pontos opostos enquanto o drone transportou o filamento para a sequência correta de tessitura, sobrevoando a altura da estrutura ainda ancorada no laboratório de fabricação. Conforme Felbrich [et al.], um processo de biomimese do casulo da larva da traça *Lyonetia Clerkella* beneficiou “[...] a transferência de princípios morfológicos e processuais para

construção por fibras de estrutura com grande vão.”³¹ (FELBRICH [et al.], 2017, p. 250, tradução nossa). Em outras palavras, os referidos autores buscaram reproduzir roboticamente os procedimentos da tal larva, por meio da programação do maquinário, conectando os movimentos de três máquinas independentes (Fig. 28), para entrelaçar uma estrutura metálica anteriormente projetada e fabricada.

Figura 28 – Modelo biológico do casulo da larva da traça *Lyonetia Clerkella*, à esquerda, e sua simulação robotizada, à direita.



2017. Crédito da imagem: Benjamin Felbrich [et al.]. Foto à esquerda: Steve Wullaert.

Figura 29 – Processo de entrelaçamento da estrutura em fibras por braço robótico e drone.



2017. Crédito da imagem: Benjamin Felbrich [et al.].

A estrutura mencionada foi composta por duas partes, sendo que a primeira delas foi entrelaçada, por um único braço robótico, anteriormente à utilização do drone. Tal parte configurou um arco inclinado que, fixado ao chão, tensionou o entrelaçamento (Fig. 29) da segunda parte de menor formato, que permaneceu ancorada em uma posição mais alta relativamente à base do arco.

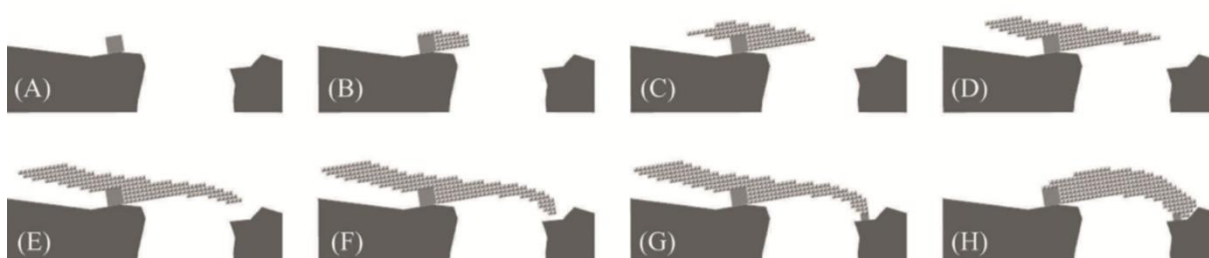
Uma vez decorrido o processo de cura da resina, previamente aplicada aos filamentos de fibra, resultou uma estrutura com um grande balanço, retirando-se a

³¹ Original: “[...] the transfer of morphological and procedural principles for long-span fibrous construction.” (FELBRICH [et al.], 2017, p. 250).

ancoragem da sua segunda parte. Com esse experimento Felbrich [et al.] (2017) procuraram criar uma estrutura reforçada por fibras que não dependesse de moldes para sua fabricação, resultando em um processo que pudesse ser mais econômico daquele muito utilizado pelas indústrias náuticas, aeroespaciais e automotivas. Os autores afirmaram que o drone serviu “[...] meramente para o transporte de material, e que a carga e precisão, requeridas para tensão do material e posicionamento, são providas pelos robôs industriais.”³² (FELBRICH [et al.], 2017, p. 249, tradução nossa). Finalmente, afirmaram que o pavilhão resultou da convergência entre desempenho do material, estabilidade estrutural, limitações de fabricação e intenção do projeto, apresentando, assim, uma prática robótica experimental que ainda deveria ser desenvolvida, uma vez que, para ser viabilizada, necessitou de assistência manual em muitas de suas fases de fabricação.

Em um último experimento, a ser analisado aqui, do grupo de pesquisas alemão, Nathan Melenbrink [et al.] (2017) exploraram uma lacuna da aplicação da robótica em arquitetura, que é a utilização da tecnologia no local da obra, bem menos utilizada em relação a processos de pré-fabricação, por exemplo. Abordaram estruturas *swarm*, em enxame, que se autocriariam em uma sequência de passos construtivos, alterando-se formalmente durante o processo (Fig. 30); o que remete à teoria da *autopoiesis* da arquitetura, de Patrik Schumacher (2011), onde se poderia justificar a autogeração da arquitetura por meio da tecnologia construtiva avançada.

Figura 30 – Roteiro de autoconstrução robotizada de estrutura *swarm*, em enxame.



2017. Crédito da imagem: Nathan Melenbrink [et al.].

Em termos biomiméticos, Melenbrink [et al.] (2017) buscaram informações materiais e processuais nos métodos construtivos de castores, formigas e pássaros

³² Original: “[...] merely for material transportation, where the precision and payload requeridas for the placing and tensioning of materials is provided by industrial robots.” (FELBRICH [et al.], 2017, p. 249)

tecelões, para aplicarem métodos espontâneos de fabricação robótica, por meio de sensores e computação baseada em agentes. Tais métodos “quando aplicados à arquitetura oferecem a possibilidade conceituar o processo de construção não como uma distinção binária entre construção e finalização, mas como uma resposta contínua, permanentemente mutável diante de vários requerimentos funcionais de alto nível”³³ (MELENBRINK [et al.], 2017, p. 383, tradução nossa). A ideia é de que se se alcançasse a máxima automação os processos construtivos poderiam ocorrer sem supervisão ou intervenção local, sendo as máquinas operadas por sequência de funções programadas para encadeamento eletrônico de comandos de execução e movimentação.

Os autores referidos acima apresentaram um panorama de referências sobre investigações no campo da utilização de múltiplos robôs para construção em arquitetura. A principal delas foi o trabalho intitulado “*Minibuilders*” realizado entre 2013 e 2014, no Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha – IAAC, pelo Grupo de Arquitetura Avançada – AAG dirigido por Areti Markopoulo. Cristina Nan (2015), uma das pesquisadoras do grupo de IAAC, publicou um estudo sobre tal trabalho experimental de construção de uma estrutura em resina plástica por uma série de três robôs pequenos que executaram um objeto maior do que eles próprios (Fig. 31). A segunda referência foi a prática industrial de construção robotizada de tijolos que construtoras norte-americanas e australianas vêm realizando. Scott Peters e Robert Belden (2014) lançaram o *Semi-Automated Mason – SAM* como uma solução para o tempo de produção e que não substitui o trabalho humano. Desde então, a prática vem se tornando mais acessível e otimizada. Lilly Cao (2019) é quem observa tais transformações no contexto mais recente da construção robótica de tijolos.

No entanto, mesmo que avanços mais recentes venham comprovando a utilização em maior escala de tecnologias avançadas para a construção civil, Melenbrink [et al.] (2017) ainda afirmaram os desafios que processos de construção robótica múltipla colocam diante de um cenário real. O estudo realizado pelos autores sobre utilização de robôs no local de obra permaneceu em um âmbito teórico e, diferentemente dos demais experimentos analisados anteriormente, não apresentou resultados de grande porte, restringindo-se a uma série de simulações

³³ Original: “When applied to architecture, it offers the possibility of conceptualizing the building process not as a binary distinction between construction and completion, but rather as an ongoing, persistently shifting response to variable high-level functional requirements.” (MELENBRINK [et al.], 2017, p. 383).

computacionais e dois protótipos de pequenos robôs construtores. Abriram, no entanto, um amplo campo de investigação de aplicação da robótica em arquitetura.

Figura 31 – Experimento “*Minibuilders*” de fabricação robótica de estrutura em resina.



2019. Crédito da imagem: IAAC. <https://iaac.net/project/minibuilders/>

As pesquisas do grupo de Stuttgart são bastante avançadas com a promoção de um trabalho concentrado que em pouco tempo buscou soluções diferenciadas, sem se manter aos padrões industriais e, nesse sentido, com avanços de um ponto de vista mais artístico. Em 2017, Achim Menges, fundador do *ICD*, participou da edição de uma compilação de artigos de investigadores e profissionais proeminentes da área da fabricação digital, em conjunto com Philip F. Yuan e Neil Leach, ambos professores da Universidade de Tongji, China. Yuan, Menges e Leach (2017) revisaram os principais conceitos apresentados pelo estudo de Branko Kolarevic (2001) quase duas décadas depois, reunindo publicações de Patrik Schumacher, Greg Lynn, Fabio Gramazio e Matthias Kohler, Roland Snooks, entre outros.

No *ICD/ITKE* Stuttgart a utilização da robótica em arquitetura foi voltada para o desenvolvimento de processos construtivos não estandardizados de materiais como a madeira e as estruturas reforçadas por fibra. Um tipo de investigação que se amparou na biomimética para extrapolar as circunstâncias dos sistemas de construção mais comuns, focalizando no desempenho das propriedades físicas e biológicas dos materiais escolhidos. O projeto computacional, a fabricação robótica e a engenharia de estruturas atuando de maneira multidisciplinar para o alargamento do campo da arquitetura.

A presença de Jan Knippers, diretor do *ITKE*, foi decisiva em grande parte dos projetos dos pavilhões, representando um suporte fundamental para as pesquisas do grupo alemão, tanto do ponto de vista da garantia estrutural, quanto da viabilização dos cálculos e processos de programação do maquinário. Propõe-se com isso uma

maior integração entre as áreas de arquitetura e engenharia diante da prática da inovação em fabricação digital.

Para tanto, percebe-se a utilização intensiva de *softwares* capazes de processar a grande quantidade de informações que os projetos consideraram, desde o primeiro de 2009 até o último aqui analisado, de 2017. A análise dos artigos publicados no período comprova, no entanto, que o grupo alemão, não detalha tais procedimentos metodológicos e não informa quais são os *softwares* utilizados, deixando, assim, uma lacuna para a possível reprodução de seus métodos. Supõe-se a utilização do *Rhinoceros*®, consequentemente do *Grasshopper*® e programação via *Python*® para controle do maquinário, na maioria dos casos. A lacuna pode ser compreendida pelo fato de que apesar das etapas de programação e projeto serem imprescindíveis, elas são exaustivas, não lineares e requerem procedimentos específicos independentemente do *software* ou código de programação a ser escolhido, não cabendo, portanto, nas descrições sucintas dos artigos analisados.

Percebe-se, também, nas publicações anteriormente descritas que a fabricação robótica é capaz de alcançar uma expressão construtiva própria na medida em que é capaz de solucionar problemas construtivos que não são viabilizados pelos métodos comuns. Por exemplo, a construção de estruturas rígidas que atuam bem à compressão por meio da execução de estruturas reforçadas por fibras tensionadas que independem de moldes dispendiosos e de produção lenta, ou a construção de estruturas muito leves para coberturas que vencem grandes vãos.

Ainda, ressalta-se que, em 2015, tomei conhecimento das soluções construtivas desenvolvidas por Burry, para a Sagrada Família, em Barcelona. Apesar das construções mais recentes terem sido finalizadas em 2016, os projetos apresentados no livro "*Scripting cultures: architectural design and programming*" (BURRY, 2011) datam de 2001 a 2004, apresentando um processo de projeto desenvolvido durante aproximadamente quinze anos. Tal autor já referenciado na seção anterior sobre "Parametrização" aplicou a robótica em um processo subtrativo para esculpir blocos de granito, por meio de robô industrial equipado com uma serra redonda giratória. Foi um trabalho escultórico, produzido digitalmente, envolvendo a posterior montagem dos blocos e encaixe de partes individuais, produzidas separadamente. De acordo com Marwan Halabi (2016), as construções mais recentes da Basílica da Sagrada Família, projetada por Antoni Gaudí, são precursoras da

utilização do processo CAD/CAM em arquitetura, uma vez que desde a década de 1980 já utilizaram máquinas CNC de grande porte para lapidação de suas colunas (Fig. 32).

Figura 32 – Fabricação digital das colunas da Sagrada Família.



2016. Crédito da imagem: Marwan Halabi.

1.1.2.1.3.1 – O papel da Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto – FAUP na pesquisa acadêmica sobre aplicação da robótica em arquitetura

Em 2017, conheci a pesquisa do *Digital Fabrication Laboratory - DFL* do Centro de Estudos de Arquitetura e Urbanismo – CEAU da Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto – FAUP, onde há a aplicação da robótica mantendo-se sistemas construtivos comuns em Portugal e materiais locais, regionalizando tal processo na arquitetura. O grupo investiga a fabricação digital de uma perspectiva humanizada, valendo-se da inovação dentro de um escopo de trabalho palpável para a circunstância socioeconômica apresentada.

Os trabalhos do *DFL* estão compilados em livro publicado em 2015 com apoio da Fundação de Ciência e Tecnologia de Portugal, editado por José Pedro Sousa (2015). O livro apresentou uma diversidade de soluções dentro de uma escala de pesquisa acadêmica. Os resultados variam no processamento de diferentes materiais, como a cortiça, o concreto, blocos de poliestireno expandido, e demonstram um potencial de utilização do braço robótico para diferentes tarefas.

Pedro Martins e José Pedro Sousa (2014) publicaram estudo teórico sobre a fabricação digital aplicada ao concreto, trazendo uma contextualização histórica a partir de três categorias: complexidade formal, textura de superfície e composição física do próprio material. Os autores incluíram referências desde de Le Corbusier e Walter Gropius até Félix Candela, I. M. Pei e Pier Luigi Nervi, sem referenciar os arquitetos brasileiros, que muito contribuíram em todas as categorias analisadas,

respectivamente, Oscar Niemeyer, Paulo Mendes da Rocha e João Filgueiras Lima, o Lelé. O estudo se concentrou, no entanto, em uma análise metodologicamente detalhada sobre as diferentes técnicas de fabricação digital e seus potenciais usos, tanto na prática quanto na pesquisa arquitetônica, para a construção do concreto armado, e apontou muitas outras referências, tais como Zaha Hadid, Frank Gehry, UN Studio, Neri Oxman, Branko Kolarevic, Fabio Gramazio e Matthias Kohler, Behrokh Khoshnevis etc. Tal análise se fundamentou, primeiramente, no tipo de intervenção dada ao material, seja ela indireta, por meio de moldes e reforços estruturais, ou direta, pela própria construção de componentes em concreto; em segundo lugar, fundamentou-se nas técnicas de fabricação computacionais, sejam elas subtrativas, aditivas ou formativas.

A partir daí, Martins e Sousa fizeram uma análise comparativa entre as diversas referências, com a intenção de identificar potenciais investigações posteriores, afirmando que houve maior “[...] desejo de materializar formas expressivas do que de alcançar efeitos customizados de superfícies [...]” e uma “[...] predominância recorrente do uso de processos subtrativos para produção de moldes customizados. Esta tendência geral da prática, levanta a importante preocupação com sustentabilidade, o que tornam os esforços de pesquisa em processos aditivos, em soluções tecnológicas promissoras.”³⁴ (MARTINS; SOUSA, 2014, p. 483, tradução nossa). Corroborar-se com os autores na compreensão que a maior parte das investigações sobre aplicação de tecnologias digitais em arquitetura tendem para a complexidade geométrica e construtiva das formas, independente do material a ser utilizado.

Posteriormente, e partindo-se de uma investigação experimental de aplicação da robótica, Pedro de Azambuja Varela e José Pedro Sousa (2015) apresentaram um estudo sobre a relação entre tecnologia e preservação do patrimônio urbano da cidade do Porto, Portugal, cujo centro histórico é tombado pela *UNESCO*. Primeiramente, os autores apontaram a facilitação da prática de conservação do patrimônio pelas técnicas de digitalização por fotogrametria e 3D *laser scanning*. Depois, referenciaram exemplos históricos de uso das tecnologias digitais tanto para projeto quanto para

³⁴ Original: “[...] desire of materialising expressive forms rather than that of achieving customized surface effects. [...] predominance of recurring to the use of subtractive processes to produce customized formwork. This general tendency in practice, raises an important concern with sustainability, which makes the research efforts on additive processes a promising technological alternative.” (MARTINS; SOUSA, 2014, p. 483).

fabricação, mencionando o caso da Basílica da Sagrada Família de Gaudí. A investigação experimental se fundamentou nesse estudo histórico prévio e escolheu o Paço Episcopal do Porto, obra do século XVIII, do arquiteto italiano Nicolau Nasoni, como alvo hipotético de restauro, mais especificamente a pedra angular, feita em granito, do arco que compõe a porta principal do edifício. O desafio inicial foi criar um modelo para ser fabricado em escala real pelo braço robótico. Para tanto, utilizou-se o *software Agisoft PhotoScan®* para gerar uma nuvem de pontos tridimensionais a partir de um levantamento fotogramétrico, o que, conseqüentemente, possibilitou a construção de uma malha com detalhes milimétricos da lapidação original, de tal forma que se criou um modelo preciso do bloco de pedra referido. (Fig. 33)

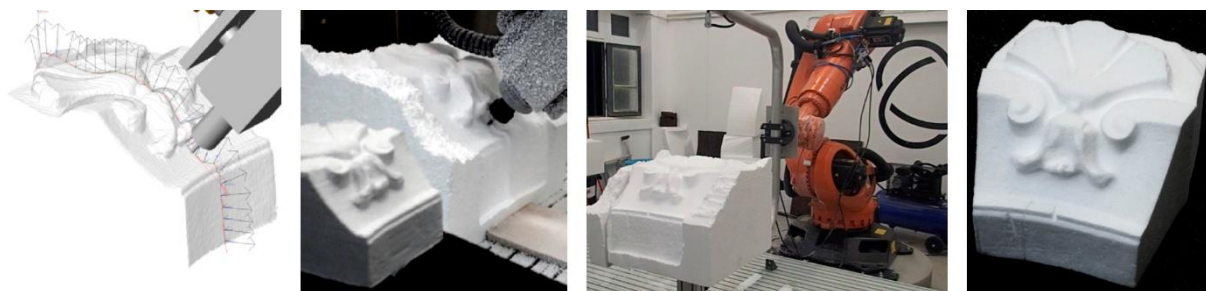
Figura 33 – Processo de fotogrametria para gerar nuvem de pontos 3D, da pedra angular do arco de entrada do Paço Episcopal do Porto, Portugal.



2015. Crédito da imagem: Pedro de Azambuja Varela e José Pedro Sousa.

Outro desafio foi transferir a informação geométrica do modelo anteriormente descrito para código de controle do braço robótico. Para produção do protótipo em escala 1:2, Varela e Sousa (2015) substituíram o granito por *EPS* e utilizaram um braço robótico *KUKA* de nove eixos em processo subtrativo que esculpiu um bloco de *EPS* utilizando o código programado com *Grasshopper®*. Os autores explicaram o processo de programação tendo em vista os parâmetros de execução do maquinário, primeiramente, um processo de fresagem da superfície esculpida e, posteriormente, um processo de corte por fio quente do bloco de *EPS* (Fig. 34). Um protótipo menor, na escala 1:10, foi impresso tridimensionalmente em plástico *ABS* para conferência geral da geometria da peça.

Figura 34 – Processo de fabricação robótica do protótipo em poliestireno expandido da pedra angular do arco de entrada do Paço Episcopal do Porto, Portugal.



2015. Crédito da imagem: Pedro de Azambuja Varela e José Pedro Sousa.

Fundamentados em trabalho experimental, Varela e Sousa afirmaram que as técnicas de produção digital “[...] permitem a reprodução tridimensional praticamente automática dos elementos construídos”³⁵ (VARELA; SOUSA, 2015, p. 725, tradução nossa), facilitando, assim, os processos de preservação de edifícios históricos.

Em um outro experimento do *DFL FAUP*, José Pedro Sousa [et al.] (2015a) apresentaram um ensaio crítico que compara o uso da robótica com técnicas de racionalização do trabalho artesanal. Inicialmente, apresentaram uma série de referências de construção não standardizada de tijolos, tais como *MARTa Hedford Museum*, de Frank Gehry, *Mulberry House*, de *SHoP architects*, e *Gantenbein Winery*, de *R-O-B Technologies*, os autores apresentaram uma referência à prática industrial de construção robotizada de tijolos que construtora norte-americana vêm realizando. No entanto, Sousa [et al.] (2015a) mantêm um posicionamento crítico em relação às mudanças que tais tecnologias podem ocasionar na construção civil em geral, apontando que:

[...] as vantagens da automação são mais claras no contexto de situações de pré-fabricação. Por outro lado, robôs ainda são tecnologias caras e incomuns na construção civil, e que, além disso, requerem vários outros dispositivos para assegurar um funcionamento flexível e autônomo (e.g., um sistema de alimentação de tijolos ao robô, uma ferramenta para assentamento de cola ou argamassa para os tijolos, ou sensores para monitorar a evolução geométrica correta da estrutura de tijolos)³⁶ (SOUSA [et al.], 2015 a, p. 363, tradução nossa).

³⁵ Original: “[...] allowing for practically automatic three-dimensional reproduction of built elements.” (VARELA; SOUSA, 2015, p. 725).

³⁶ Original: “[...] the advantages of automation are clearer in the context of prefabrication scenarios. On the other hand, robots are still expensive and uncommon technology in building construction, which, furthermore, require several other automation devices to assure a flexible and autonomous functioning

Após a contextualização histórica e teórica, os autores referidos acima apresentaram os resultados de um experimento que comprovou a viabilidade de técnicas de racionalização do trabalho manual por meio de vídeo projeções, em comparação à construção de torre de blocos de *EPS* pelo braço robótico. Os procedimentos metodológicos seguiram uma mesma configuração de blocos, montada de duas maneiras diferentes, a primeira a partir da programação *Grasshopper*® dos movimentos e operações do robô e a segunda por meio de uma sequência de imagens previamente elaboradas, que foram projetadas sobre a sequência de fiadas de tijolos que compuseram a configuração da torre. É interessante notar como as pequenas diferenças entre um procedimento e outro não resultaram em grandes discrepâncias visuais (Fig. 35). Sousa [et al.] (2015a) concluíram que a aplicação da robótica ainda se constitui um desafio, principalmente para situações econômicas menos favorecidas, ou seja, compreende-se que ainda é um campo que necessita de investigações mais extensas, de forma a torná-la mais eficiente e acessível.

Figura 35 – Comparação entre processo de fabricação robótica e processo de racionalização de trabalho manual por projeção de vídeo, para montagem de torre de blocos em *EPS*.



2015. Crédito da imagem: José Pedro Sousa [et al.].

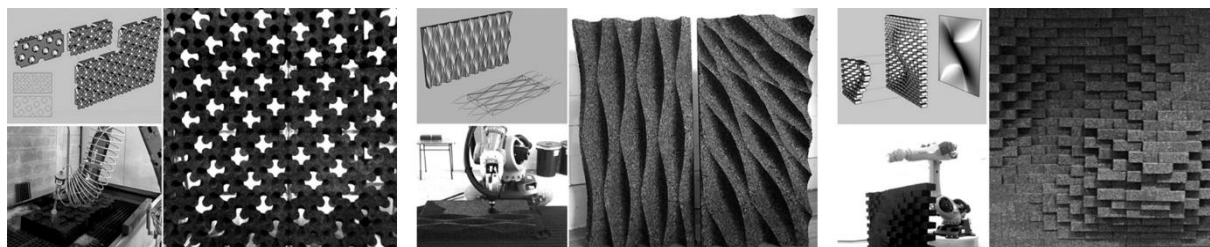
Em mais uma publicação, os pesquisadores do *DFL FAUP* teorizaram sobre o uso de robôs na arquitetura, ao apresentarem uma série de experimentos de processamento de cortiça para uso na construção civil. Portugal detém uma grande indústria de produção de cortiça e Álvaro Siza utilizou, pela primeira vez, tal material no Pavilhão de Portugal para a Expo 2000, em Hanover, Alemanha, como um material

(e.g., a system for feeding the bricks to the robot, a tool for laying the mortar or glue on the bricks, or sensors to monitor the correct geometric evolution of the built structure).” (SOUSA [et al.], 2015 a, p. 363).

de revestimento do edifício, ao invés de sua aplicação mais comum, como um material de isolamento termoacústico. Atualmente, o pavilhão foi reconstruído em Coimbra. Nesse sentido, José Pedro Sousa [et al.] (2015b) contribuíram para uma inclusão da alta tecnologia em diversas escalas e modos de aplicação na arquitetura, por meio de um material sustentável.

Os experimentos apresentados pelos autores referidos anteriormente reuniram uma variedade de técnicas de corte, fresagem e montagem robótica (Fig. 36), e demonstraram uma evolução dos trabalhos realizados por máquinas e sistemas de programação distintos. Apontaram para os benefícios que o *plug-in KUKA/prc*® do *Grasshopper*® trouxe, mais recentemente, para o trabalho arquitetônico, em termos da otimização do trabalho de programação do braço robótico. Entende-se que Sousa [et al.] (2015b) regionalizaram a fabricação robótica por meio do processamento de um material natural e reciclável, largamente produzido no contexto português, sem desconsiderar a contribuição precedente de José Pedro Sousa (2010), em sua tese de doutorado.

Figura 36 – Exemplos de fabricação robótica aplicada à cortiça.



2015. Crédito da imagem: José Pedro Sousa [et al.].

Em um estudo sobre a influência da fabricação robótica no âmbito do ensino da arquitetura, José Pedro Sousa e João Pedro Xavier (2015) apresentaram importante relato de experiência em nível de mestrado com aplicação de um braço robótico para o empilhamento de tijolos de *EPS*. Primeiramente, os autores descreveram as principais dificuldades envolvidas na implantação do *DFL FAUP*, a partir de três condicionantes: a segurança de utilização, uma vez que há um maior risco de acidentes na utilização do braço robótico em comparação a outras máquinas CNC; a complexidade de programação, pois a movimentação do robô é bem mais complexa, além de que é ordenada em relação às ferramentas que utiliza, seja uma fresadora, um extrusor, um fio quente etc.; e a resistência disciplinar de introduzir uma

tal multidisciplinaridade em um currículo acadêmico vigente. Depois, apresentaram os métodos utilizados nas dinâmicas com quarenta e dois estudantes, divididos em grupos de duas a três pessoas. Inicialmente, os grupos criaram modelos para a escolha de um único que seria montado pelo robô e depois receberam tutoriais a respeito da programação dos movimentos da máquina por meio do *plug-in KUKA/prc*® do *Grasshopper*®, para execução do modelo escolhido (Fig. 37). Em conclusão, Sousa e Xavier (2015) apresentaram resultados interessantes para uma sequência de cinco aulas dadas aos estudantes e afirmaram as dificuldades por eles encontradas para o controle do maquinário, apesar do potencial de lhes revelar a influência da tectônica dos materiais na concepção de arquitetura.

Figura 37 – Processo de criação e montagem robótica de torre de tijolos em *EPS* por estudantes de mestrado do *DFL FAUP*.



2015. Crédito da imagem: José Pedro Sousa e João Pedro Xavier.

Em um projeto que, de certo modo, sintetizou alguns dos experimentos anteriores, o grupo de pesquisadores portugueses apresentou um sistema desenvolvido para a construção de um arco em concreto reforçado por fibra de vidro, ou *glass-fibre reinforced concrete – GRC*, revestido por cortiça. No relatório de produção do “*CorkCrete Arch*”, José Pedro Sousa [et al.] (2016), descreveram os principais resultados encontrados em um processo experimental de investigação cujas referências foram os trabalhos de *ETH* de Zurique e *ICD/ITKE* de Stuttgart. A criação do projeto se deu, essencialmente, pela escolha dos materiais e suas propriedades performativas. O *GRC* para o desempenho estrutural e que, ao mesmo tempo, mantém os elementos mais leves do que aqueles em concreto reforçado por aço; e a cortiça para o revestimento exterior da estrutura e conseqüente proteção mecânica às intempéries. A partir das decisões formais do arco, tais como a utilização da curva

catenária para as superfícies externas dos dois materiais e a escolha da polilinha poligonal para as superfícies de encontro entre eles, houve a transposição dessas informações para um projeto algorítmico feito com o *Grasshopper*®. Tal método de projeto possibilitou “[...] ajustes ao longo do processo sem comprometer o fluxo de informação digital entre projeto e especificações de fabricação”³⁷ (SOUSA [et al.], 2016, p. 737, tradução nossa), evidenciando, assim, uma das vantagens de utilização de tal *software*.

Com relação à fabricação das peças que compuseram o arco, os autores mencionados no parágrafo anterior descreveram um processo dividido em duas etapas. A primeira para construção da estrutura em *GRC* e a segunda para fabricação dos revestimentos em cortiça, ambas etapas racionalizadas por um braço robótico. Sousa [et al.] (2016) afirmaram que as informações parametricamente geradas pelo *Grasshopper*® foram diretamente transpostas para algoritmos de programação dos movimentos do maquinário, o que otimizou as diversas etapas de pré-fabricação dos dois materiais. Apenas a moldagem dos elementos em concreto e a montagem do conjunto de peças foram produzidas artesanalmente, resultando em uma obra estruturalmente estável e funcional, e com interessante apelo visual (Fig. 38). Os autores contribuíram no sentido de aplicarem a fabricação robótica em favor da construção de sistema inovador que conjuga desempenho estrutural com um revestimento sustentável, a partir do processamento de um material largamente utilizado em Portugal.

Figura 38 – Processo de fabricação robótica do “*CorkCrete Arch*” do *DFL FAUP*.



2016. Crédito da imagem: José Pedro Sousa [et al.].

³⁷ Original: “[...] adjustments along the process without compromising the digital flow of information between the design and fabrication specifications.” (Sousa [et al.], 2016, p. 737).

Em uma outra publicação sobre o mesmo projeto descrito anteriormente, José Pedro Sousa e Pedro Filipe Martins (2016) aprofundaram as descrições sobre os processos de fabricação da estrutura em GRC do “*CorkCrete Arch*”. Um trabalho não estandardizado de corte e fresagem de blocos EPS, por meio de braço robótico, para moldagem de elementos de concreto reforçado por fibra de vidro. Primeiramente, os autores fizeram um breve histórico das aplicações do GRC na arquitetura contemporânea. Depois, apresentaram os procedimentos metodológicos da estrutura em questão, detalhando cada uma das etapas. Concluíram com o interesse de ainda continuarem as investigações, no sentido de melhorar o acabamento da superfície dos componentes em GRC, uma vez as peças desmoldadas do EPS, minimizando, assim, o tempo de produção artesanal posterior. Um processo de moldagem semelhante foi utilizado por Frank Gehry para a fabricação de elementos de concreto armado para o Complexo *Zollhof*, em Düsseldorf, Alemanha, mas sem envolver o uso de braço robótico, ao utilizar fresadoras CNC de grande porte, mas com apenas três eixos de movimentação (SOUSA; DUARTE, 2005).

Varela e Sousa (2016; 2019) realizaram um estudo amplo sobre a estereotomia, técnica de construção clássica de lapidação de pedra a partir de um sistema de montagem por encaixes entre blocos. Sendo a principal referência histórica a obra de Philibert de L’Orme, do século XVI, revisaram a estereotomia até as aplicações contemporâneas. Alguns exemplos foram apresentados, como: a Casa da Música, na cidade do Porto, Portugal, projetada por OMA; o *Experience Music Project Museum* de Frank Gehry; a Ponte *Truchet* de Giuseppe Fallacara; o Hall da cidade de Arles, França; e o *Armadillo Vault*, projetado pelo *Block Research Group – BRG*, da *ETH* de Zurique, para a Bienal de Arquitetura de Veneza, 2016. De fato, os autores criaram uma base semântica, por meio de uma categorização própria, para a análise das diferentes técnicas de estereotomia, independente do período histórico, permitindo uma comparação em relação aos avanços tecnológicos e construtivos.

As pesquisas do *DFL FAUP* são rigorosas quanto à maneira de aplicar a robótica em arquitetura. Os pesquisadores portugueses realizaram um trabalho concentrado que, em pouco tempo, buscou soluções diferenciadas, sem se manter aos padrões industriais e, nesse sentido, com avanços de um ponto de vista da inovação em construção civil. Conforme informado anteriormente, em 2015, Sousa (2015) editou a publicação dos experimentos desenvolvidos no *DFL FAUP* e, desde

então, o grupo vem contribuindo com a disseminação do conhecimento a respeito da integração entre arquitetura e tecnologia. Tal trabalho culminou com a recém-sediada Conferência eCAADe + SIGraDi 2019, na cidade do Porto.

No *DFL FAUP* a tecnologia é utilizada a depender das circunstâncias de cada projeto e tendo em vista a sustentabilidade dos meios produtivos. A questão disciplinar da arquitetura é valorizada, apesar de interfaces com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP e com o Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência – INESC TEC, também da cidade do Porto. A ação de tornar a tecnologia mais palpável para a arquitetura é valorizada.

Percebe-se nas publicações que o rápido desenvolvimento das pesquisas se deu pela inteligência em partir dos estudos prévios, principalmente focados nas mesmas instituições analisadas anteriormente, a saber *ETH* e *ICD/ITKE*, ou seja, com um alinhamento à pesquisa europeia já desenvolvida. Além disso, apresentaram a preocupação com a aplicação em situação econômica, talvez por isso, a perspectiva dada com relação ao futuro das aplicações, já que a maior parte dos potenciais usuários ainda não dispõem das tecnologias necessárias.

1.1.2.1.3.2 – Fabricação robótica em arquitetura: outros estudos e o contexto brasileiro

Recentemente, o uso de robôs para a produção de peças, componentes, sistemas construtivos inteiros, tem sido alvo de investigação multidisciplinar. Nuno Silva (2017) apresentou um histórico da aplicação da robótica em diversos setores industriais, apresentando um quadro de desenvolvimento extensivo na China. Apresenta, também, um experimento de viabilidade econômica da construção robótica por meio da utilização de drones para construção de alvenaria, tendo em vista experimento de Federico Augugliaro [et al.] (2013). Na Universidade de Hong Kong, Christian J. Lange (2017), experimentou a fabricação robotizada de estruturas de madeira, inovando na execução não standardizada. A pesquisa sobre aplicação de drones foi conduzida primeiramente na *ETH* Zurique, por Jan Willmann [et al.] (2012).

Em termos gerais, os experimentos aqui apresentados conduziram a uma compreensão que amplia o campo de projeto e construção em arquitetura. O escopo de projeto arquitetônico pode se ampliar quando o arquiteto assumir a execução de partes da obra por meio da fabricação digital. O uso da robótica, ou da fabricação

digital em geral, pode ser conduzido ao âmbito da construção civil, na medida em que se executem componentes construtivos realmente duráveis. A parametrização é o que possibilita ao arquiteto reunir uma série de informações condicionantes do projeto em um modelo algorítmico, que poderá se constituir em um sistema generativo das formas do edifício projetado, sejam as suas partes estruturais, seus fechamentos, ou seus acabamentos. A técnica também possibilita o controle do maquinário robótico por meio do *KUKA/prc*®. Portanto, abre-se uma teoria complementar ao projeto arquitetônico, de roteirização da produção digital, o que conduz a possibilidade de o arquiteto detalhar os sistemas construtivos em pormenores de sua execução, ou pré-fabricação.

Deve se mencionar que houve um recorte deliberado em estudos europeus, os quais foram mais divulgados nas duas décadas de análise, dentro do meio arquitetônico. Sabe-se que EUA e Japão são os países que detêm o maior *know how* na área da robótica, ao estabelecerem as pesquisas precursoras, ainda na década de 1960 (NEGROPONTE, 1970; TEICHOLZ, 1985; OXMAN, 2014). Kolarevic (2003) referenciou as tecnologias japonesas em sua compilação de produção digital em arquitetura. A Europa, dentro de um panorama diverso, divide seus estudos tanto para o aprofundamento das tecnologias de construção, quanto para o âmbito da arquitetura moderna, principalmente na Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto, cuja expressão se encontra nas obras dos arquitetos Álvaro Siza e Eduardo Souto de Moura.

A temática da fabricação robótica aplicada à arquitetura no Brasil é ainda restrita ao se comparar com as pesquisas de outros países, como EUA, Alemanha e Suíça. A tecnologia é utilizada nas indústrias automobilística, naval, aeroespacial, mas não para a construção de espaços habitáveis e urbanos. Diante da ausência de pesquisa sistemática sobre a robótica em arquitetura, pode se constatar que não há base de dados sobre esse campo de investigação. O contexto da fabricação digital em arquitetura no Brasil tem Lelé como expoente. Embora o arquiteto não tenha utilizado a fabricação robótica em sua obra, pela própria limitação do contexto, Lelé aplicou métodos de construção assistida por computador, por exemplo, na obra do Beijódromo.

1.1.2.2 – O Beijódromo e a fabricação digital em Brasília

Esta seção se concentra na análise dos processos projetivos e construtivos do Beijódromo, de autoria de Lelé. Dentro da análise serão observados aqueles processos associados ao uso da fabricação digital, tentando verificar a maneira como o arquiteto utilizou os recursos computadorizados de corte à plasma para alcançar a forma final do edifício. Lelé utilizou processos computadorizados para alcançar o resultado do Beijódromo. Ao projetar, o arquiteto já conhecia o processo metalúrgico, portanto, detalhou o projeto utilizando tais parâmetros em um processo de racionalização da construção.

Tal fato conduz à consideração de Lelé como precursor de uma maneira de se construir inclusiva de processos avançados de produção – orientada por diretrizes construtivas – em concordância com as condicionantes fabris locais. Portanto, considera-se o Beijódromo como exemplo de construção amparada pela fabricação digital.

Figura 39 – Foto do Beijódromo, Lelé.



Crédito da imagem: Joana França.

Beijódromo, exemplo de precursão do uso da fabricação digital na construção civil no contexto de Brasília-DF (Fig. 39). Tal edificação projetada e construída por João Filgueiras Lima, Lelé, é exemplo de uma maneira de se construir que inclui o uso do computador como ferramenta produtiva e não apenas como um instrumento de representação. E mesmo que o computador tenha sido usado de maneira pouco

aprofundada em relação às técnicas disponíveis na atualidade, ao colocar-se em perspectiva o que Lelé teve à disposição em sua época, percebe-se o quanto a realidade construtiva é o que mais vale para a arquitetura.

A dependência do processo computadorizado para a realização de tal estrutura é evidente, tanto para o seu detalhamento executivo, quanto para sua fabricação e montagem *in loco*. Portanto, há a significação da obra de Lelé como um ponto de inflexão frente às vertentes de racionalização construtiva e, a partir daí, percebe-se como as técnicas que se encontram à disposição atualmente podem impulsionar todas as etapas do processo de construção.

O que comprova tal fato é um relato concedido por Vicente Muñoz³⁸, um dos colaboradores de Lelé na época da construção do Beijódromo, onde está registrada a maneira como o arquiteto produziu o edifício por meio da GRAVIA, empresa metalúrgica do contexto. Ressalta-se que esse processo de fabricação digital que o arquiteto utilizou ainda não foi inteiramente sistematizado e documentado pela historiografia.

1.1.2.2.1 – Concepção e projeto do Beijódromo

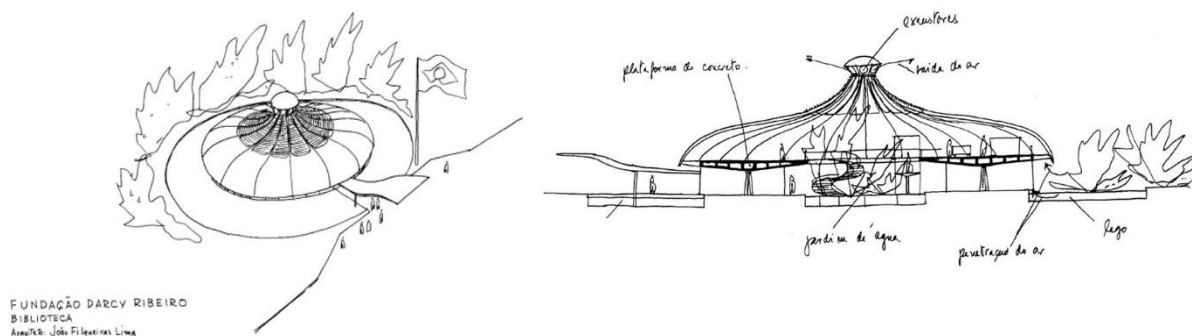
O Beijódromo foi projetado ao longo de bastante tempo. Lelé concebeu o edifício a partir da amizade com o próprio Darcy, que em 1996 decidiu deixar seu legado em um espaço dentro da UnB, dedicado ao encontro, ao namoro, aos relacionamentos. Segundo o próprio arquiteto, a forma do Beijódromo remete a esse movimento de conexão: “o que queria resolver realmente era a questão de um espaço que todo mundo dominasse, exatamente como Darcy sempre foi: ele interagiu com todo mundo. Nada como um círculo, para criar esta unidade espacial.” (LIMA, 2004, p. 99).

A forma também remeteria à construção indígena típica do Brasil, o que se relaciona conceitualmente ao próprio trabalho de Darcy Ribeiro, mantendo essa alusão em uma esfera simbólica. A oca desenvolve as relações estruturais e distribuições de cargas de maneira radial, desde a base até a ponta da cobertura. Conforme Lelé, “a cabana dos índios [...] possui ventilação, até um *shed* como esse

³⁸ Entrevista em anexo, realizada em 29 de agosto de 2017, na fábrica da GRAVIA, localizada no Setor de Indústrias e Abastecimento – SIA de Brasília – DF, durante esta pesquisa para tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade de Brasília – PPG/FAU/UnB.

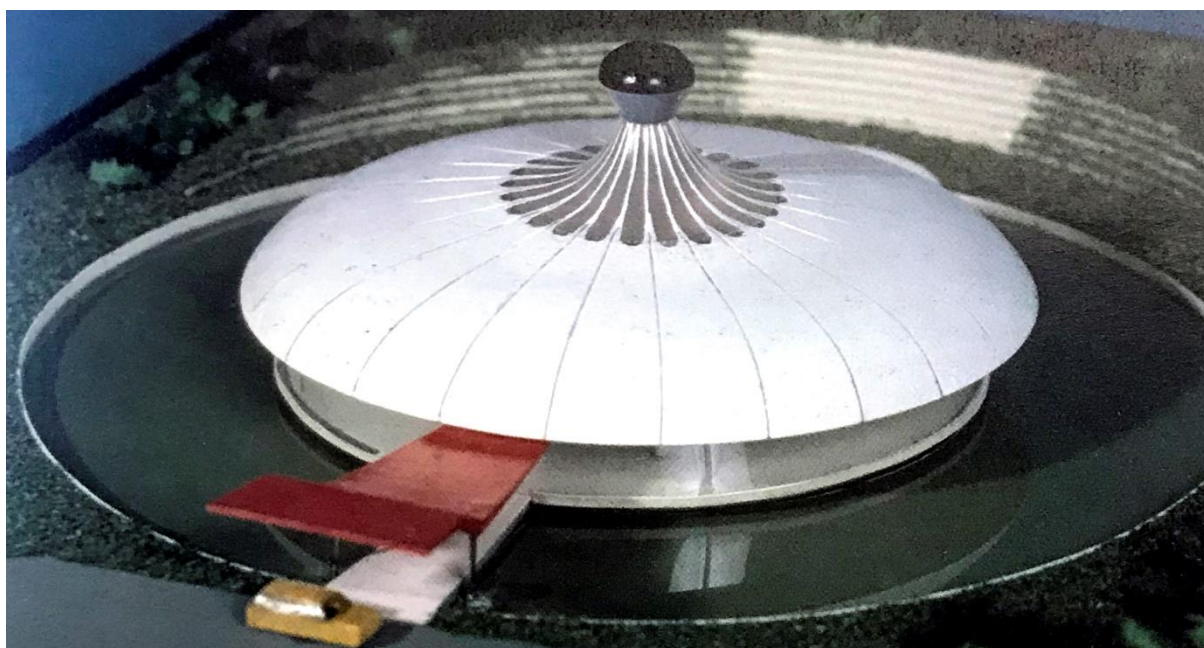
que utilizo em meus trabalhos. Fazem a cobertura de palha, passando uma por cima da outra, tem uma cumeeira por onde sai o ar quente [...]. No projeto da Fundação Darcy Ribeiro, a grande cobertura tem um sentido um pouco disso [...]" (LIMA, 2004, p. 98-99). (Figs. 40 e 41)

Figura 40 – Croquis do projeto do Beijódromo.



Crédito da imagem: João Filgueiras Lima, Lelé.

Figura 41 – Maquete palpável do projeto do Beijódromo.



Crédito da imagem: Instituto Brasileiro da Tecnologia do Habitat – IBTH.

Em seus depoimentos à jornalista Cynara Menezes, Lelé fala sobre o Beijódromo ainda enquanto um sonho que nunca havia sido realizado: “seria um espaço ao ar livre, na grama, nos degraus – um espaço bem ao gosto de Brasília, em que se podia fazer serestas, as pessoas poderiam estar em volta se beijando,

namorando. Para uso noturno, principalmente. Pena que não se concretizou.” (LIMA, 2004, p. 26).

Cláudia Estrela Porto (2011) descreveu o programa de necessidades do projeto da seguinte maneira:

A distribuição dos ambientes na proposta inicial reflete o programa estabelecido *a priori* por Darcy Ribeiro. No pavimento térreo seriam alocados o hall de entrada, área de exposições, sala para seminários e manutenção de livros e o Beijódromo. O pavimento superior, sem pilares e totalmente flexível, acomodaria a biblioteca propriamente dita (PORTO, 2011, p. 46-47).

A descrição do projeto, presente no memorial descritivo de Lelé, é a melhor síntese sobre o edifício, citado por Andrey Rosenthal Schlee que pontuou ao fim de seu artigo o ainda projeto do Beijódromo.

Fundação Darcy Ribeiro – Biblioteca: edifício circular em dois pavimentos de 31,60 m de diâmetro de 37 m de diâmetro da cobertura, formando na parte central um espaço circular ajardinado com 12 m de diâmetro e pé direito duplo. O nível térreo é apoiado no solo e o nível superior constituído de laje de concreto armado apoiada em 32 vigas radiais metálicas engastadas em 32 pilaretes também metálicos dispostos na periferia da construção e em anel circular interno que distribui sua carga para 8 pilares metálicos tubulares. A estrutura da cobertura é formada por 32 vigas radiais apoiadas externamente nas vigas do piso superior e internamente em anel metálico com 3 m de diâmetro. A cobertura é composta com telhas especiais dobradas em chapas pré-pintadas de aço galvanizado e, no trecho correspondente ao espaço interno ajardinado, em chapas de policarbonato alveolado com 6 mm de espessura. Internamente são dispostas, a modo de forro, lâminas de aço pré-pintado que funcionam como brises na área coberta com policarbonato. O prédio é totalmente circundado por lago formando um anel com diâmetro de 52 m. O acesso ao prédio é constituído por uma ponte protegida por marquise metálica com 70 m² de área construída. Na parte posterior do prédio foi prevista uma elevação com taludes de 2 m de altura, executado com a própria terra resultante da escavação do lago. O taludé voltado para o prédio, parcialmente revestido com placas de concreto, forma um pequeno teatro de arena. O palco ocupa a parte externa do lago e comunica-se com o prédio através de uma ponte (LIMA apud SCHLEE, 2010, p. 162-164).

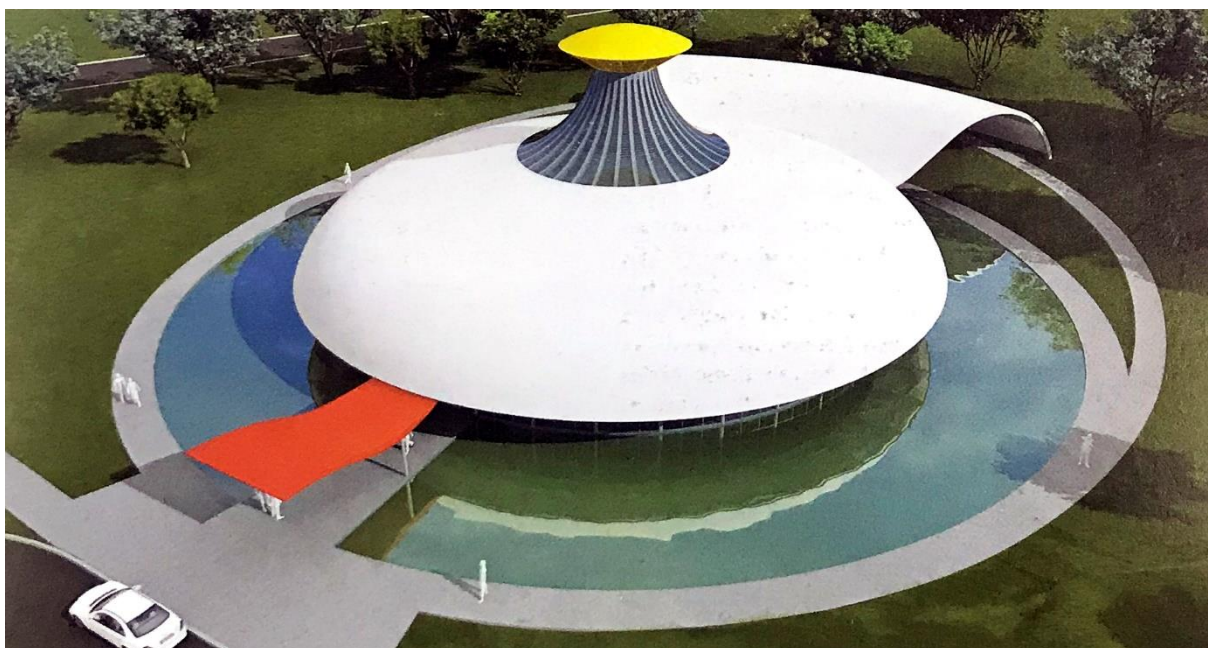
Antonio Risério (2010) é outro autor que aborda o projeto, apenas brevemente em um artigo sobre a trajetória de Lelé. Na época também ainda não construído, aponta a relação entre arquitetura e antropologia, ancorando-se nos depoimentos do próprio Lelé sobre as construções indígenas.

Segundo depoimento de Vicente Muñoz, o projeto foi elaborado dentro do Instituto Brasileiro da Tecnologia do Habitat – IBTH, constituído em Salvador – BA, e composto por vários projetistas especializados em diversas áreas da construção, desde marcenaria, serralheria, até engenharia mecânica. Conforme o relato, a maior

parte do trabalho foi detalhado dentro do IBTH, incluindo todos os componentes metálicos, esquadrias, coberturas, até o elevador interno foi planejado por Lelé e sua equipe.

Ainda de acordo com Muñoz, o projeto foi desenvolvido utilizando-se de recursos computacionais, especificamente o *AutoCAD®* para o detalhamento e documentação da execução da obra. Os documentos gerados foram planilhados para o cronograma de processamento da fábrica, e repassados para a GRAVIA, que apenas forneceu a matéria-prima, processada de acordo com a demanda. Além disso, houve também uma modelagem tridimensional que simulou, de forma bastante aproximada, a realidade construtiva, modelada a partir do próprio detalhamento desenvolvido pelo Instituto (Fig. 42).

Figura 42 – Modelo tridimensional renderizado do projeto do Beijódromo.



Crédito da imagem: Instituto Brasileiro da Tecnologia do Habitat – IBTH.

1.1.2.2.2 – Racionalismo de Lelé para o processo construtivo

Para a construção do Beijódromo, Lelé afirmou que:

O projeto foi, naturalmente, ajustado ao novo programa da Fundação [Darcy Ribeiro]. As questões de segurança, por exemplo, tornaram-se muito mais agudas nos últimos anos e o espaço informal que Darcy gostaria de ter na biblioteca, onde as pessoas pudessem livremente consultar livro em estantes móveis, se tornou impossível. Algumas modificações mais radicais, como a transformação do Beijódromo em auditório com 200 lugares, foram realizadas com muito cuidado para não tirar o caráter informal do espaço e permitir que,

mesmo sem o luar, os casais sejam estimulados a se beijarem do jeito Darcy (LIMA, 2011, p. 38).

Em um importante registro sobre o processo de construção do Beijódromo, Haroldo Pinheiro (2011), afirmou o racionalismo do processo arquitetônico de Lelé, talvez um estilo pessoal do arquiteto, que realmente planejou cada milímetro do projeto.

Observa-se na arquitetura de Lelé, particularmente na Fundação Darcy Ribeiro, a presença da lógica, reiterada na implantação do edifício, na escolha das técnicas construtivas, na solução estudada para o mais singular detalhe da obra. Maneja as alternativas oferecidas pela tecnologia contemporânea e as utiliza conscientemente em favor da preservação dos recursos oferecidos pela natureza, cuidadosamente adequadas à circunstância social em que se situa (PINHEIRO, 2011, p. 55).

As fotografias presentes no artigo de Pinheiro (2011) são bastante elucidativas quanto ao método de execução das peças estruturais metálicas fixadas sobre fundações de concreto armado. A metalurgia do edifício se destaca pela complexidade geométrica alcançada dos componentes curvos, gerando uma topologia com apelo visual, um senso plástico e dinâmico, característicos da obra de Lelé. (Fig. 43)

Figura 43 – Fotos da construção do Beijódromo.



2010. Crédito da imagem: Haroldo Pinheiro.

Risério, mantendo a visão antropológica de sua análise, afirma “o empenho total de Lelé no campo da inovação e da pesquisa, da pré-fabricação [...]. Mas, articulando conhecimento e pesquisa, informação e prática, signos e fazeres, o que vamos encontrar é consciência e sensibilidade social.” (RISÉRIO, 2011, p. 62).

Acrescida ao principal volume do edifício, posicionou-se uma fatia ondulada que abriga o atual auditório, totalizando uma área coberta de dois mil, quatrocentos e cinquenta e cinco metros quadrados. A entrada principal é marcada por uma marquise sinuosa vermelha. Uma faixa amarela, constituída por um conjunto de *brises soleils* metálicos, circunda todo o edifício, combinando com a cumeeira também amarela. Concentricamente, um pequeno lago também rodeia a edificação, seguido pelo conjunto de calçadas de pedestres. De acordo com Porto, Lelé “nunca visualizou o lago apenas como um espelho d’água de cunho estético, sem plantas. Sempre desejou ter ‘um jardim aquático’, por isso projetou-o com 60 cm de profundidade para acolher ninfeias [...]” (PORTO, 2011, p. 51).

Sobre o processo de execução da obra, ressalta-se o protagonismo de Adriana Filgueiras Lima, arquiteta, filha de Lelé. Segundo as palavras do arquiteto, Adriana “[...] tem muita sensibilidade para a arquitetura, mas gosta mesmo é de construção, de obra.” (LIMA, 2004, p. 47-48). Ela acompanhou toda a obra do Beijódromo e, de acordo com depoimento de Vicente Muñoz, resolveu boa parte do detalhamento dentro do canteiro, assumindo a responsabilidade pela execução e montagem até a inauguração, em 2010.

Um modelo de obra seca que atingiu um alto nível de industrialização, possibilitando o processamento personalizado do aço. O diferencial do processamento metalúrgico foi a utilização de máquina CNC de corte bidimensional à plasma, que ocorreu na fábrica da GRAVIA, em Taguatinga – DF. Já no canteiro de obras, um pequeno galpão foi montado para abrigar os trabalhos de serralheria, segundo depoimento de Muñoz, incluindo o corte, soldagem e a calandragem de componentes em aço.

As peças processadas pela fornecedora chegaram ao canteiro, muitas vezes, para ainda serem reprocessadas e depois montadas. Vicente Muñoz ressaltou que até os retalhos das chapas residuais foram devolvidos ao canteiro. Afirmou também que Lelé estava presente constantemente no canteiro para acompanhamento da obra, criando uma pequena fábrica metalúrgica ali.

1.1.2.2.3 – Vicente Muñoz sobre o projeto e construção do Beijódromo

Vicente Muñoz trouxe uma perspectiva da obra de Lelé que, apesar de já ter sido analisada do ponto de vista industrial ou construtivo, ainda não foi observada por sua especificidade produtiva. Além disso, Muñoz expressou um sentimento de entusiasmo respeitoso em relação ao trabalho do Doutor Lelé, como o referenciava durante a entrevista. Descreveu o arquiteto como bastante detalhista durante o projeto em muitos aspectos, não só em relação à qualidade gráfica da documentação técnica, mas, também, na orientação das equipes de trabalho.

Afirmou a atuação decisiva de Adriana Filgueiras Lima durante a etapa de execução da obra e relata que Adriana registrou todos os processos e, portanto, detém um conteúdo valioso a respeito dos métodos executivos que o arquiteto elaborou, racionalizando as etapas de construção.

Muñoz relatou o relacionamento de Lelé com as fábricas fornecedoras, mas também expressou o caráter industrial da própria produção do arquiteto, ao explicar como se deu a personalização de elementos singulares e sua catalogação, para a obra do Beijódromo. Peças únicas que foram, segundo termo do próprio Muñoz, planilhadas e entregues à fábrica em um sistema de produção que atrasou, em certas ocasiões, nem sempre seguindo uma linearidade e muitas vezes improvisando durante a obra, mas que entregou todo o material necessário e requerido, dentro do prazo final.

Outra questão interessante relatada foi a respeito da existência do IBTH, aberto logo após Lelé se desvincular dos Centros Tecnológicos da Rede Sarah – CTRS. O instituto atuou de maneira interdisciplinar dentro de um mesmo sistema produtivo onde diversas áreas interagem entre si, marcenaria, serralheria, metalurgia, engenharia mecânica, arquitetura, design, construção.

Outra questão bastante reforçada no relato de Muñoz foi o trabalho de projeto utilizando o computador, no *AutoCAD*®. Um dos projetistas do IBTH dedicava-se à modelagem tridimensional dos projetos e, como já mencionado, realizou-se uma modelagem detalhada do Beijódromo, para documentação técnica. Por outro lado, Lelé desenhava à mão livre e compartilhava as informações desenhadas com os projetistas, integrando o método de projeto computacional com conteúdo artístico.

Muñoz expressou brevemente que muitos cálculos eram feitos pelo próprio Lelé, mas que ele consultava o engenheiro Roberto Vitorino, para o cálculo estrutural. Além disso, relatou que Lelé era um excelente orçamentista.

1.1.2.2.4 – A precursão de Lelé na fabricação digital no Brasil

Apesar do Beijódromo não ser o primeiro edifício onde Lelé utilizou a fabricação digital, outros exemplos são os Hospitais Sarah Lago Norte e Sarah Setor Hospitalar Sul, destaca-se por ter a identidade específica da capital brasileira, vinculada à UnB, ao legado de Darcy Ribeiro, em conjunto com o trabalho dos arquitetos construtores da cidade. Porto informou que a construção do Beijódromo “teria de lançar mão de uma tecnologia só disponível, na época, no Centro de Tecnologia da Rede Sarah” (PORTO, 2011, p. 48). No entanto, o relato de Vicente Muñoz trouxe a informação de que o trabalho foi feito dentro do IBTH, quando Lelé já não mais trabalhava no CTRS. E, portanto, fez isso utilizando uma tecnologia que, na época, já estava disponível no contexto brasiliense. Tal informação sobre o projeto elaborado dentro do Instituto é confirmada pelo então reitor da UnB, José Geraldo Sousa Júnior:

A cada dia, equipes bem organizadas, apetrechadas, com plano bem definido e segura direção do Instituto Brasileiro de Tecnologia do Habitat (IBTH) – presidido pelo próprio Lelé e tendo no canteiro a presença coordenadora da arquiteta Adriana Filgueiras – começaram a dar forma à edificação, muito assemelhada ao desenho descrito na carta de Lelé para Darcy [...] (SOUSA JR., 2011, p. 18).

Pinheiro (2011) trouxe o racionalismo, a industrialização do processo construtivo que Lelé utilizou como método para sua arquitetura. Com relação ao modo de trabalho de Lelé, Schlee mencionou apenas “uma precisa produção industrializada” (SCHLEE, 2010, p. 162), sem mencionar especificamente a fabricação digital. Risério (2011) observou o Beijódromo de um ponto de vista antropológico. Todos os registros mencionados são importantes para reforçar o papel determinante da obra de Lelé no contexto da arquitetura brasileira, mas há uma dimensão mais específica sobre os processos de construção que ainda falta ser reconhecida.

O reconhecimento de Lelé como um arquiteto que incluiu em seu repertório a inovação dos recursos tecnológicos. A automação de certas partes do processo construtivo foi imprescindível para a resolução de problemas estruturais na obra do

Beijódromo. Por isso, deve ser considerada uma obra precursora, não apenas para a arquitetura brasiliense, mas para o contexto nacional.

Lelé já pensava industrialmente desde que se engajou com a construção de Brasília, mas no Beijódromo ele colocou a serviço um aparato controlado por computador para cortar as almas cheias das vigas em perfil I, que compõem a estrutura do edifício. A complexidade geométrica que necessitou de um tipo de produção digital para sua viabilização.

1.1.2.2.5 – Considerações sobre o estudo do Beijódromo

Considera-se importante construir tal visão a respeito desta obra para que a aplicação de tais tecnologias possa se tornar cada vez mais viável para a utilização de toda a cultura arquitetônica local. O Beijódromo como marco da arquitetura brasiliense também do ponto de vista tecnológico – a tecnologia como um elo entre a arte de Lelé e seu racionalismo construtivo. Além disso, foi uma obra inteiramente atendida por um fornecedor local, vinculando-se estritamente a um tipo de execução que utiliza a base produtiva do contexto. O que conduz à compreensão de Lelé como um arquiteto precursor da fabricação digital aplicada à construção civil, em Brasília – DF.

Especificamente dentro das restrições da indústria brasiliense, percebe-se que todo o processo automatizado ocorreu no contexto. Portanto, é ainda importante mencionar como é imprescindível a compreensão dos processos construtivos para a produção de espaços como o Beijódromo. Lelé detinha o conhecimento metalúrgico, entre tantos outros, necessário para detalhar todos os elementos de uma composição arquitetônica complexa em sua forma, funcional na distribuição dos espaços, confortável ambientalmente. Por isso, transformou o canteiro de obras em uma fábrica para calandragem, soldagem e processamento de peças metálicas, além de ter utilizado o corte bidimensional computadorizado para materializar a estética curvilínea arrojada do edifício.

Na medida em que houve o reconhecimento das etapas de projeto e construção do edifício do Beijódromo, foi possível visualizar a reprodução dos métodos arquitetônicos de Lelé, por meio de modelagem algorítmica, ao associar questões estruturais, de planejamento da obra e de pré-fabricação de componentes metálicos. Diante da prática profissional em arquitetura, no contexto contemporâneo brasileiro,

há uma valoração de tais métodos no sentido de se alcançar maior sustentabilidade dos meios produtivos.

Quando Lelé escreveu, em carta ao seu amigo Darcy Ribeiro, que o Beijódromo poderia ser tanto uma oca quanto um disco voador, conforme transcrição presente em Giancarlo Latorraca (1999), talvez ele tivesse em vista a compreensão de todo o processo *high-tech* envolvido na obra da oca à Darcy. O maquinário pesado da indústria metalúrgica, a execução milimétrica do canteiro convertido em fábrica e como isso realmente possibilitou uma construção mais econômica e viável. A visão pioneira das tecnologias inovadoras sendo produzidas no lugar onde habitamos.

CAPÍTULO 2

2.1 – Primeiro experimento: produção digital da Catedral de Palmas

Apresenta-se aqui um experimento de aplicação da técnica de parametrização ao projeto arquitetônico com o objetivo de demonstrar um conjunto de técnicas de projeto parametrizado e prototipagem rápida para automatização de partes do suposto processo de fabricação digital e construção de um edifício. Discute-se a expansão do campo de trabalho do arquiteto. Uma vez que o profissional detiver a aplicação de tecnologias avançadas para industrialização da construção, poderá ser responsável por partes do projeto de engenharia.

O projeto da Catedral de Palmas, capital do estado de Tocantins, de autoria do arquiteto Paulo Henrique Paranhos, não foi construído, mas desde a década de 1970 continua a ser desenvolvido, como uma espécie de laboratório para experimentações conceituais, formais, plásticas, do arquiteto – que a princípio era estudante do curso de arquitetura da UnB.

De fato, compreende-se uma base colaborativa envolvida nesse projeto, uma vez que diversos profissionais já participaram de etapas diferentes do seu desenvolvimento. A partir do traço original do autor já se projetou, por exemplo, em 2003, um estudo preliminar para participação na Bienal de Arquitetura de São Paulo, e, em 2015, o projeto foi retomado para uma especulação sobre aplicação de técnicas e tecnologias que possibilitam conceber estruturas com nível elevado de complexidade geométrica.

Procurou-se solucionar o problema estrutural dos grandes vãos idealizados por meio de um projeto parametrizado, com o intuito de apresentar uma solução inicial que poderia ser desenvolvida posteriormente. Dessa forma, verificar possibilidades de aplicação dos métodos aqui utilizados e, ao mesmo tempo, valorizar uma prática existente por meio de recursos avançados de produção, aplicados em um projeto de grande porte. Com isso, pretende-se possibilitar a compreensão de uma maneira de aplicar tais técnicas ao projeto de arquitetura.

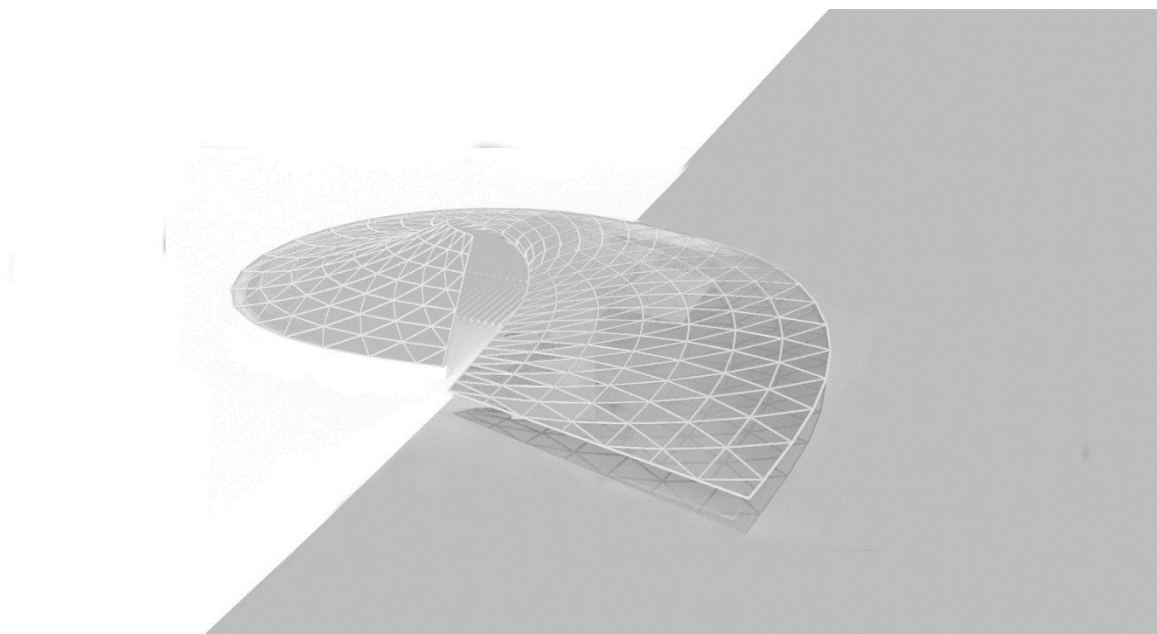
Apresenta-se um estudo de detalhamento das barras e encaixes da treliça espacial que configuraria a cobertura da catedral, fundamentado em um esquema estrutural hipotético. Tal estudo foi organizado por meio de um modelo parametrizado, orientado, a princípio, para a prototipagem rápida, mas que mantém atenção ao possível processo de construção por meio da fabricação digital.

2.1.1 – O traço do arquiteto e a parametrização

Este experimento acadêmico foi realizado em colaboração direta com o arquiteto Paulo Henrique Paranhos, durante aproximadamente um ano e meio, desde o início do primeiro semestre de 2015 até o fim do primeiro semestre de 2016. O trabalho iniciou durante a disciplina “Estudos especiais em tecnologia: prototipagem rápida e fabricação digital” do programa de pós-graduação desta universidade, sob a orientação dos Professores Doutores Neander Furtado Silva e Francisco Leite Aviani. Foi desenvolvido por uma investigação que simulou etapas de projeto arquitetônico, mesmo depois de finalizada a disciplina, com reuniões no escritório do arquiteto, para alinhar pensamentos, debater teorias, ajustar as formas do desenho, entre outras ações comuns do processo de projeto.

Durante o período mencionado, houve um trabalho sistemático de desenvolvimento do projeto arquitetônico, onde as técnicas de desenho à mão livre do arquiteto dialogaram com as técnicas digitais por mim propostas. Buscou-se o entrosamento entre desenho e parametrização, com o objetivo de verificar como a parametrização poderia ser utilizada na prática cotidiana de um projeto de arquitetura.

Figura 44 – Perspectiva renderizada do modelo tridimensional do projeto da Catedral de Palmas – TO.



2017. Crédito da imagem: Paulo Henrique Paranhos arquitetura.

Paulo Henrique Paranhos compartilhou o seu projeto da Catedral de Palmas (Fig. 44), com a intenção de avançar o detalhamento estrutural da cobertura do edifício

que, até o momento, ainda permanecia sem uma resolução objetiva. As representações ainda eram parciais e não solucionavam de maneira consistente o desafio do grande vão que o projeto propunha. Supunha-se, pelos desenhos existentes, uma estrutura em treliça metálica recoberta por um material translúcido que permitiria visualizar a iluminação interna do edifício à noite.

O local onde o projeto seria implantado é a Praça dos Girassóis, onde a Nova Catedral Metropolitana de Palmas está sendo construída, próxima ao Palácio Araguaia e ao Memorial Coluna Prestes, obra de Oscar Niemeyer. A praça concentra diversos edifícios governamentais e dispõe a Catedral em local privilegiado, no centro cívico da cidade. O projeto de Paulo Henrique Paranhos tem, portanto, um caráter especulativo e não tem previsão de ser, de fato, executado, uma vez que a obra oficial já está em fase de construção.

O referido projeto se destaca por um gesto sutil, conformado geometricamente pelo que se entende com uma superfície regrada, conforme definição de Helmut Pottmann [et al.] (2007). Ressalta-se como a associação geométrica do traço do arquiteto se apresentava intuitivamente em seus croquis. Conforme memória do arquiteto, foi quando utilizou, pela primeira vez, o computador com mouse para desenhar.

Originalmente, o projeto foi pensado como uma série de pranchas retas que, devido à sua organização, seria percebida como uma superfície em dupla curvatura. Os desenhos (Fig. 45) demonstram, com clareza geométrica, o arranjo da superfície regrada que conformaria a cobertura da catedral. Pottmann [et al.] (2007, p. 311, tradução nossa) define esse tipo de geometria como uma superfície “gerada por uma linha reta em movimento [...] que contém uma família contínua de linhas retas [...]”.³⁹ Tal geometria possibilita idealizar uma estrutura composta por treliças planas, em movimento radial.

A solução estrutural mencionada foi apresentada em etapa posterior do desenvolvimento do projeto (Fig. 46), quando modelos *3DS Max*® foram produzidos pelo arquiteto Eder Alencar. Nesse momento, configurou-se uma composição de treliças com o objetivo de vencer vãos livres de aproximadamente trinta metros. As imagens dessa etapa apresentam um modelo tridimensional de malha triangulada,

³⁹ Original: “[...] generated by a moving straight line. [...] they contain a continuous family of straight lines [...]” (POTTMANN [et al.], 2007; p. 311).

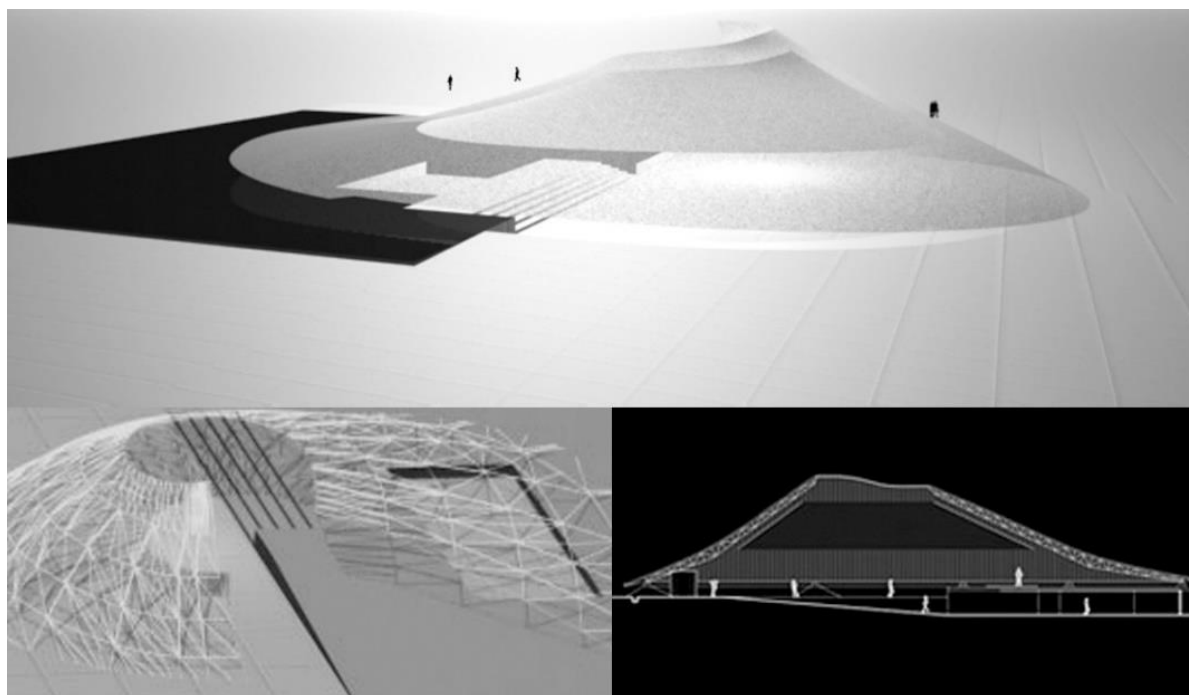
mas ainda sem precisão construtiva. Já o corte do projeto indica uma configuração inicial da treliça.

Figura 45 – Primeiros croquis para projeto da Catedral de Palmas – TO.



Crédito da imagem: Paulo Henrique Paranhos arquitetura.

Figura 46 – Imagens iniciais do projeto da Catedral de Palmas – TO.



Crédito da imagem: Paulo Henrique Paranhos arquitetura.

A partir das informações herdadas dos modelos *3DS Max*® referidos, o projeto foi desenvolvido com a intenção de propor uma nova configuração estrutural, idealizando-se a cobertura como uma treliça espacial e não mais como uma organização de treliças planas. Para tanto, considerou-se a aplicação de meios produtivos avançados, de maneira a se prever, inclusive, uma hipotética execução da obra.

Nesse momento, a geometria do projeto foi reconfigurada e ajustes foram feitos para melhor caracterizar a conceituação teórica da proposta. Em termos conceituais, a cobertura da catedral representaria um movimento que se inicia verticalmente, simbolizando a ascensão divina, e termina horizontalmente, sobre o espelho d'água, remetendo à humanização e naturalização da religião.

2.1.2 – Primeira fase do estudo de detalhamento

A primeira etapa do estudo foi idealizar um modelo de treliça espacial adequado à concepção original. A primeira ação executada foi modelar, diretamente sobre a malha importada para o *software Rhinoceros*®, duas *splines* ao longo das duas bordas curvas da superfície poligonal modelada originalmente no *software 3DS Max*®. Registra-se, nesse momento inicial, a opção pelo processo de modelagem ponto a ponto em detrimento de qualquer processo paramétrico, principalmente como uma forma de melhor apreender a geometria originada pelo traço do arquiteto. A partir das duas linhas gerou-se a superfície que seria manipulada apenas por algoritmos daí para frente.

Como uma maneira de testar o grau de variabilidade proporcionado pela parametrização, desenvolveram-se opções de subdivisão⁴⁰ da superfície mais externa que daria a propriedade de estanqueidade da cobertura – supostamente uma camada de vidro montada em perfis de alumínio. Nesse momento foram desenvolvidos os primeiros algoritmos que configuraram uma amostragem de subdivisões, totalizando quinze opções de superfícies estruturadas de acordo com famílias diferentes: triangulares, quadrangulares, hexagonais, entre outras; em um esforço para apresentar o máximo possível de opções, sem modelar nenhuma delas, apenas por meio de definições *Grasshopper*®.

⁴⁰ Define-se “subdivisão” como o processo de dividir, em planos menores, uma superfície maior de formato livre. Na linguagem dos *softwares* seria o processo de subdivisão de uma superfície poliédrica, conforme Pottmann [et al.] (2007, p. 397-409).

Em determinado momento desse processo específico, decidiu-se trabalhar com a família de subdivisões triangulares, reinterpretando a superfície regradada, conforme alguns parâmetros de desempenho. Primeiro pelo caráter simbólico religioso, segundo pelo reconhecimento comum de que as estruturas triangulares são mais estáveis, terceiro devido às obras de referência de Massimiliano Fuksas – tais como a Feira de Milão, o Palácio da ex-União Militar e, o mais recente, Parque Rlike (Fig. 47) –, que nos demonstram possibilidades executivas viáveis, principalmente na etapa de detalhamento das peças menores.

Figura 47 – Fotos das obras: Feira de Milão, Parque Rlike e Palácio da ex-União Militar, da esquerda para direita.

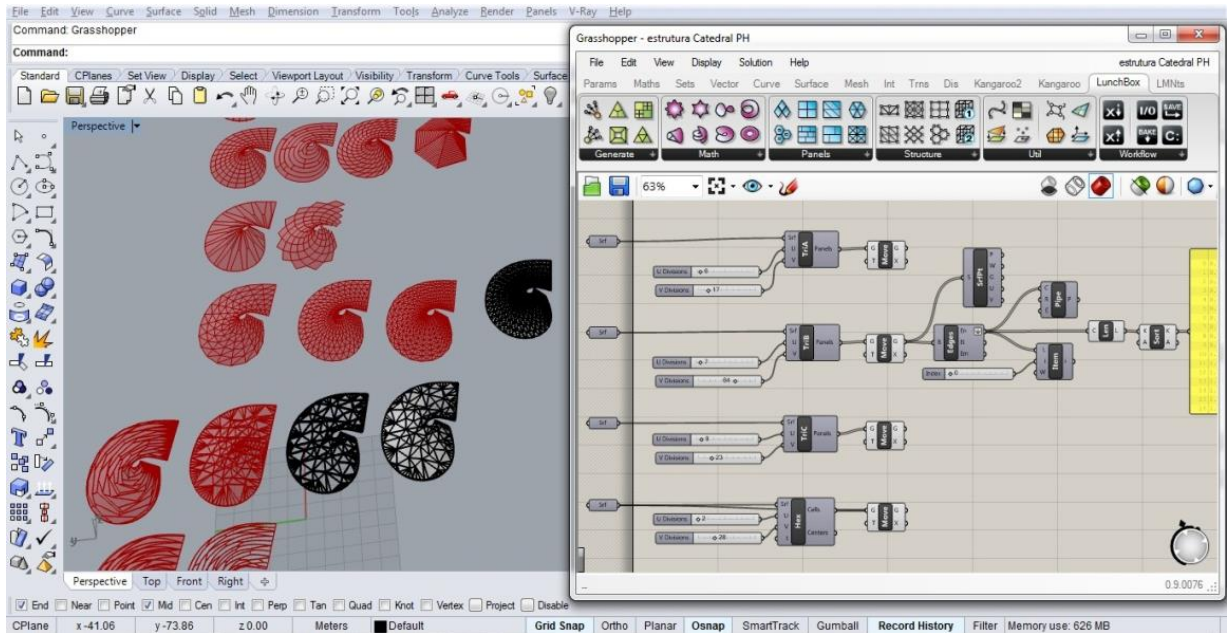


Crédito da imagem: Massimiliano Fuksas arquitetura.

Todos os quinze algoritmos foram facilitados por um *add-on* do *Grasshopper*® intitulado *Lunchbox*®, que aperfeiçoa o processo de subdivisão, automatizando uma série de funções de ordenamento de pontos adquiridos de uma superfície, para posterior ligação por segmentos de reta e conseqüente geração de malhas poligonais (Fig. 48).

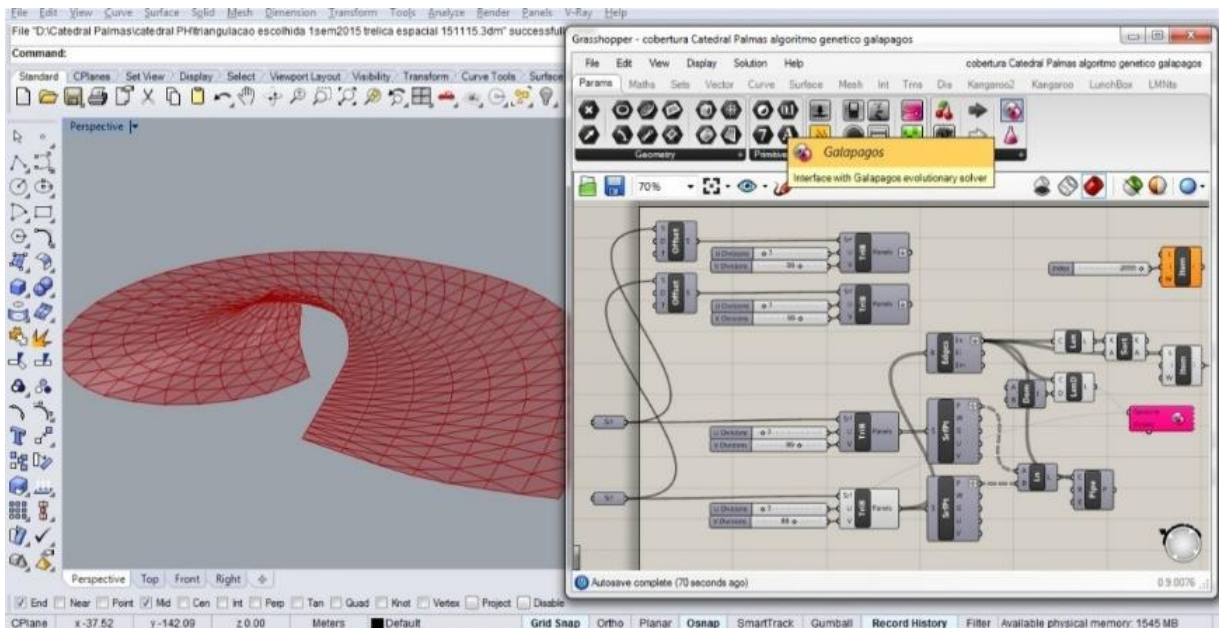
A partir daí procurou-se ajustar a estrutura da malha triangulada para o padrão construtivo conhecido na região, onde o fabricante corta peças de no máximo seis metros, uma vez que esse é o tamanho máximo das barras de aço disponíveis. Nesse momento, para se triar a amostragem de malhas trianguladas, foi utilizado um algoritmo genético, por meio da função *Galapagos*® do *Grasshopper*® (Fig. 49), para selecionar a melhor opção entre todas as variações que foram propostas, dentro de um domínio de tamanho máximo de peças entre 5,90 a 6,00 metros – considerando-se uma margem efetiva para o corte das extremidades para encaixe. Assim, avaliou-se de forma automatizada o desempenho das muitas possibilidades presentes na família de triangulações escolhida, apresentando-se apenas os resultados adequados e excluindo-se aqueles que não atendem as diretrizes projetivas de desempenho.

Figura 48 – Amostragem de subdivisões criadas com o *LunchBox*®.



2015. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Figura 49 – Função do algoritmo genético por meio do componente *Galapagos* do *Grasshopper*®.



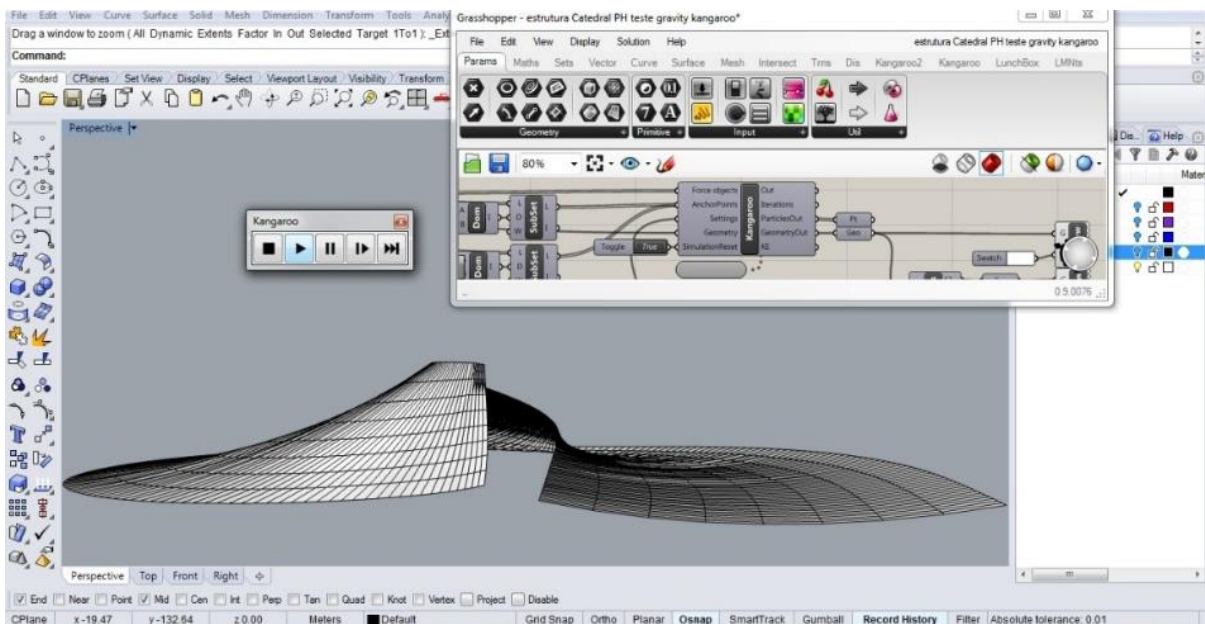
2015. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Para solucionar a questão a respeito do tipo de estrutura que sustentaria a camada de vidro impermeabilizada, foi feita uma consulta ao engenheiro Leonardo Katori. A principal dúvida levantada foi com relação aos grandes vãos a serem vencidos, em alguns trechos de até trinta metros. A solução mais evidente, encontrada

pelo engenheiro, sobre como vencer tal vão sem apoios intermediários, seria projetar uma treliça espacial, restando, então, a questão sobre as características geométricas da treliça – idealmente conforme características da própria camada de vidro inicial. A principal dificuldade, a partir daí, foi definir uma geometria que tanto detivesse as propriedades estruturais necessárias, quanto fosse construtivamente exequível.

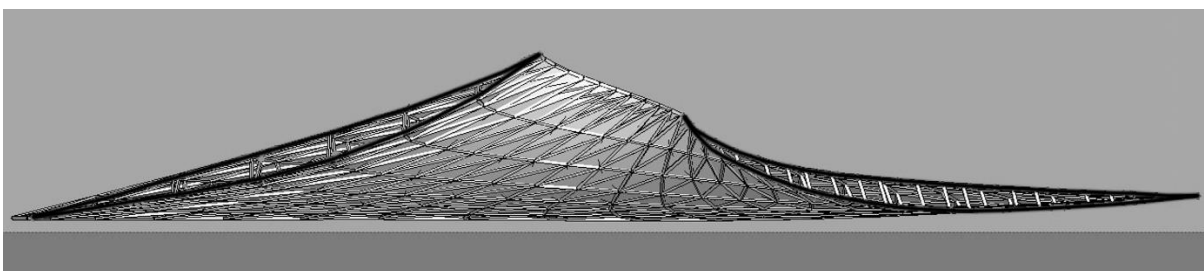
Para a tarefa houve a proposição de um algoritmo de simulação estrutural. A ideia era submeter, a superfície *NURBS* original, a um teste gravitacional, de forma a compreender o seu comportamento mediante a simulação de forças sobre a geometria. O resultado encontrado foi a superfície mínima, de acordo com definição de Rebello (2000, p. 221-222), a partir do relaxamento da superfície ancorada em pontos que simulam os apoios da cobertura. Tal algoritmo foi desenvolvido a partir das funções de outro *add-on* do *Grasshopper*®, intitulado *Kangaroo*®, que possibilita a simulação de diversos tipos de estruturas: tensionadas, funiculares. (Fig. 50)

Figura 50 – Simulação gravitacional de superfície *NURBS* por meio do *Kangaroo*®.



2015. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Figura 51 – Corte da treliça espacial projetada.

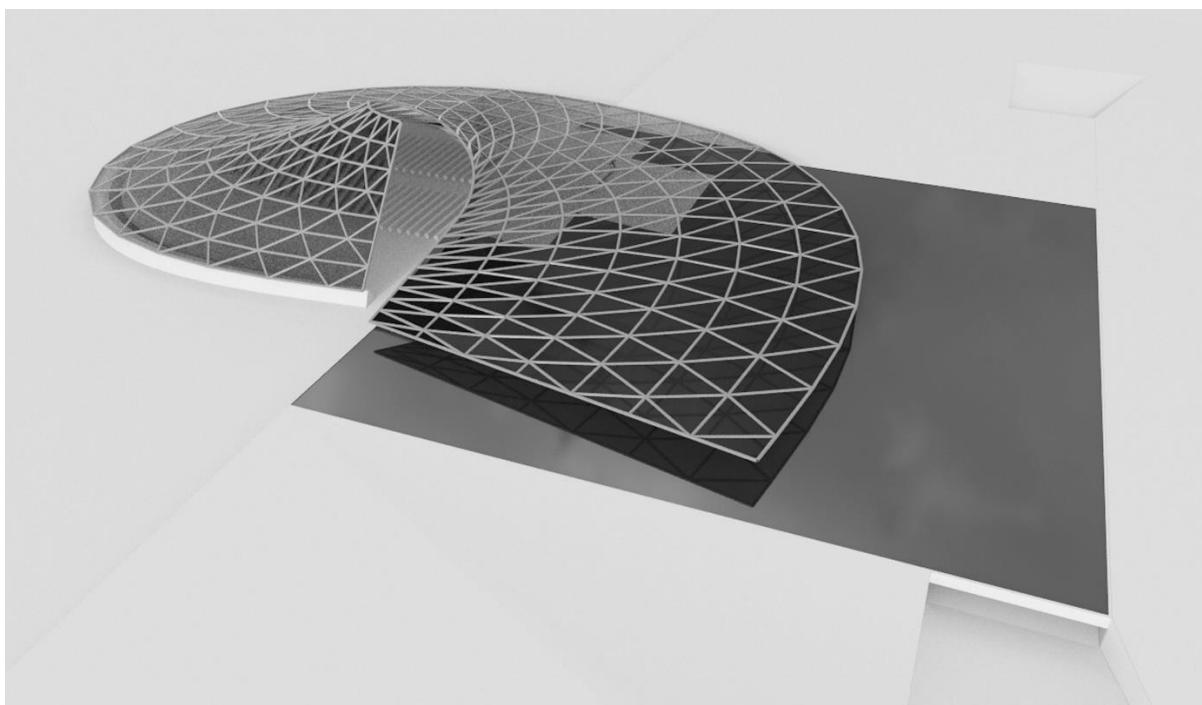


2015. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Em seguida, essa superfície resultante da simulação gravitacional foi tratada com o mesmo padrão de subdivisão triangulada e, ao ser inserida abaixo da camada de vidro, possibilitou gerar um modelo de treliça metálica a partir de barras que serviriam como ligações entre os pontos nodais de cada uma (Fig. 51). Desse ponto em diante, tal modelo poderia ser avaliado por *softwares* de cálculo para o dimensionamento das barras e para a solução de outras questões estruturais.

Uma camada de forro, possivelmente um misto de gesso cartonado e vidro, seria aplicada imediatamente abaixo da treliça, com o intuito de dificultar a transferência de calor para o interior da edificação, devido ao bolsão de ar que seria conformado entre as duas camadas mencionadas. Além disso, criaria, finalmente, uma zona sombreada para altar e público, garantindo o conforto térmico do ambiente.

Figura 52 – Imagem renderizada do modelo tridimensional do projeto da Catedral de Palmas – TO.



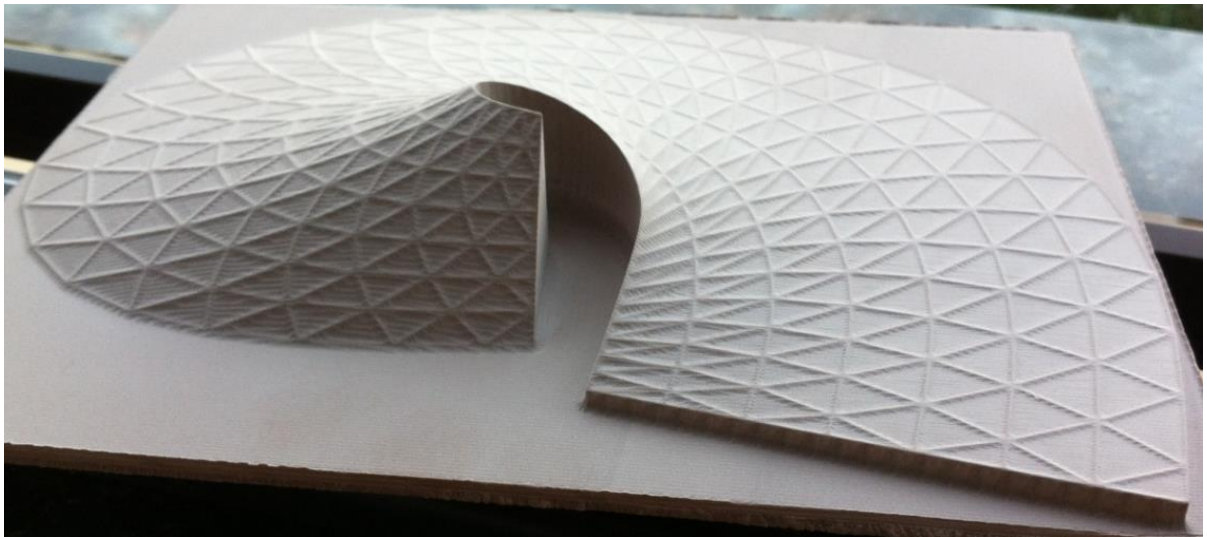
2015. Crédito da imagem: Hermes Romão.

Ressalta-se que no modelo parametrizado as informações para a construção podem ser resgatadas no momento que for necessário, seja o tamanho das barras, a planificação do vidro ou do gesso, e a partir daí pode se quantificar todo o material a ser utilizado e também planejar a fabricação das peças. Além disso, deve se ratificar que o modelo tridimensional guarda as informações geométricas originais que caso venham a ser modificadas, podem transformar os algoritmos automaticamente.

Portanto, se houverem rearranjos formais tudo pode ser transformado consequentemente.

Durante esta primeira fase do estudo de detalhamento uma nova renderização da catedral foi feita pelo arquiteto Hermes Romão, em junho de 2015 (Fig. 52). Percebe-se nessa imagem uma maior consistência entre a representação gráfica e a possibilidade construtiva definida pelo projeto paramétrico, entre tantas outras possibilidades de subdivisão, indicando como o projeto evoluiu desde o estudo preliminar.

Figura 53 – Protótipo em resina de poliuretano.



2015. Crédito da imagem: elaborado pelo autor

Figura 54 – Protótipo em plástico *PLA*.



2016. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

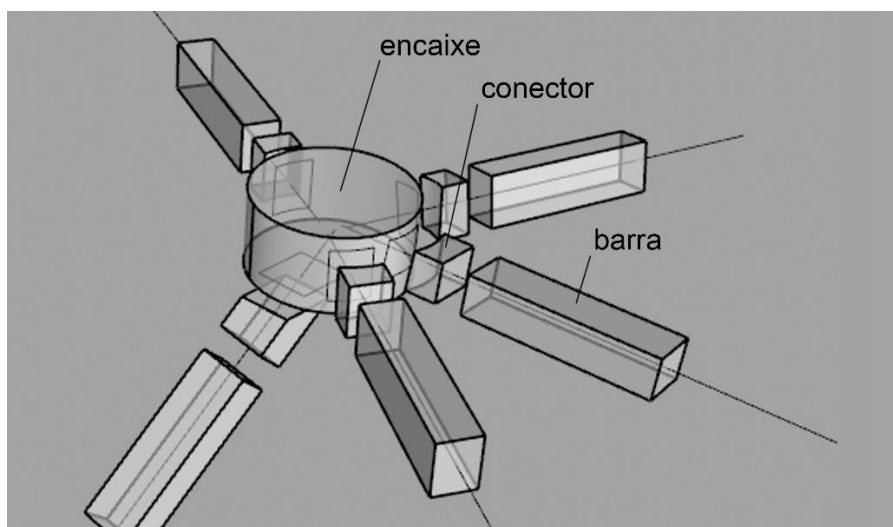
Dois protótipos foram feitos nesta etapa. O primeiro deles foi feito por uma fresadora CNC de pequeno porte, para um protótipo em resina de poliuretano de alta densidade, medindo aproximadamente doze centímetros de comprimento. O modelo simulou os mesmos tamanhos das barras apresentadas nas imagens renderizadas, criando, assim, uma unidade de apresentação do projeto (Fig. 53).

O segundo protótipo, impresso em 3D em plástico PLA, foi realizado depois dos ajustes da modelagem tridimensional da cobertura (Fig. 54). Então, foi possível visualizar uma geometria levemente alterada em relação ao primeiro modelo. Foi interessante notar que esse modelo, de certa forma, possibilitou prever possíveis fragilidades do esquema estrutural, pois em certos trechos o plástico não se depositou de forma efetiva.

2.1.3 – Segunda fase do estudo de detalhamento

Uma vez concebido o modelo de treliça espacial, partiu-se, então, para a idealização de um possível processo de fabricação de partes de sua estrutura (Fig. 55). A primeira decisão foi utilizar tubos retangulares de quinze por vinte centímetros para as barras, configurados pela soldagem de dois perfis “U” enrijecidos. Para os encaixes, foi pensado um sistema cilíndrico calandrado, com sessenta centímetros de diâmetro, provido de conectores soldados, ao longo do perímetro externo, nas mesmas angulações das barras, de tal forma, que possibilitem encaixá-las na posição correta, conforme configuração da treliça.

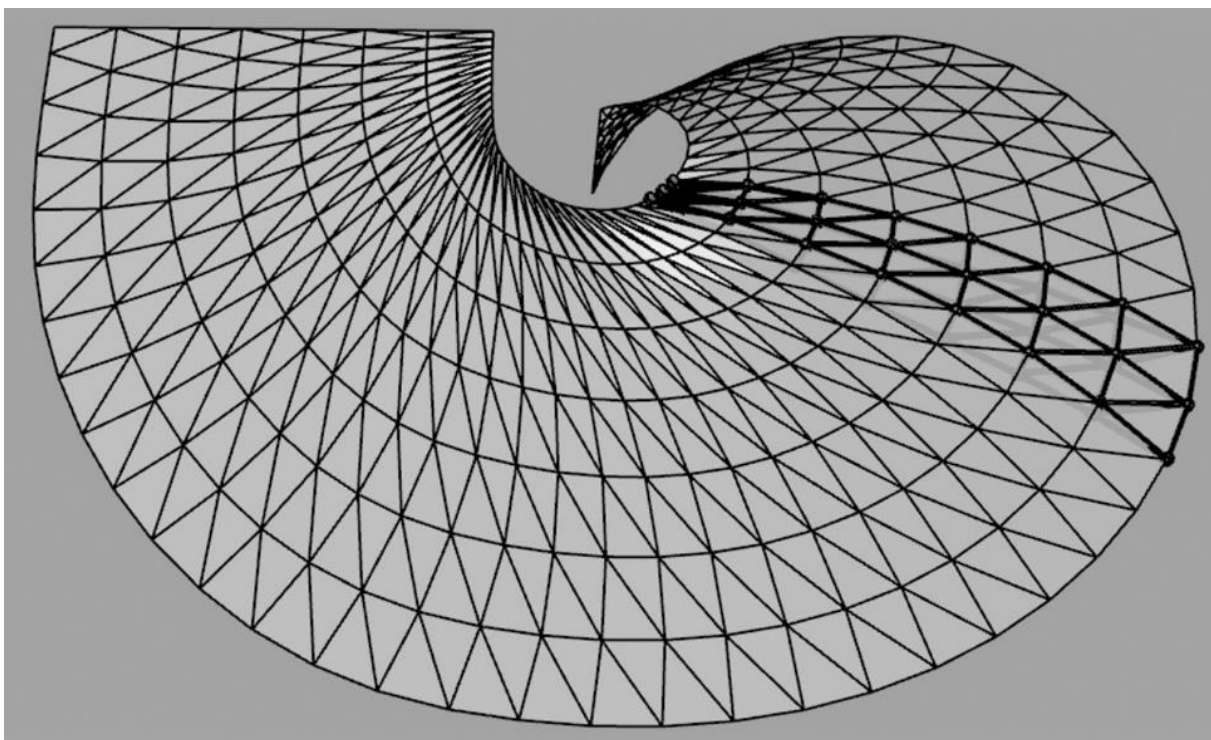
Figura 55 – Sistema de encaixe projetado para conexão das barras que comporiam a treliça metálica.



2016. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Tal decisão foi tomada a partir de dois fundamentos. O primeiro, uma limitação comum do contexto produtivo brasileiro que é a predominância do corte bidimensional, já que não se encontra usualmente maquinário além dos três eixos de movimentação. Nesse sentido, observou-se as limitações tecnológicas do contexto, ou seja, manteve-se a perspectiva regional da construção civil, como um dos parâmetros que determinaram esta fase do estudo de detalhamento. O segundo fundamento foi um pré-dimensionamento empírico para a treliça espacial metálica, levando-se em consideração cargas médias e vãos entre encaixes variando em torno de quatro metros. O pré-dimensionamento foi fundamentado em Rebello (2000, p. 157), a partir de gráfico que apresenta a variação de altura da treliça espacial em relação ao vão adotado. Conforme o gráfico, a treliça teria uma altura aproximada de um metro e cinquenta centímetros.

Figura 56 – Escolha da seção com maior vão para detalhamento.

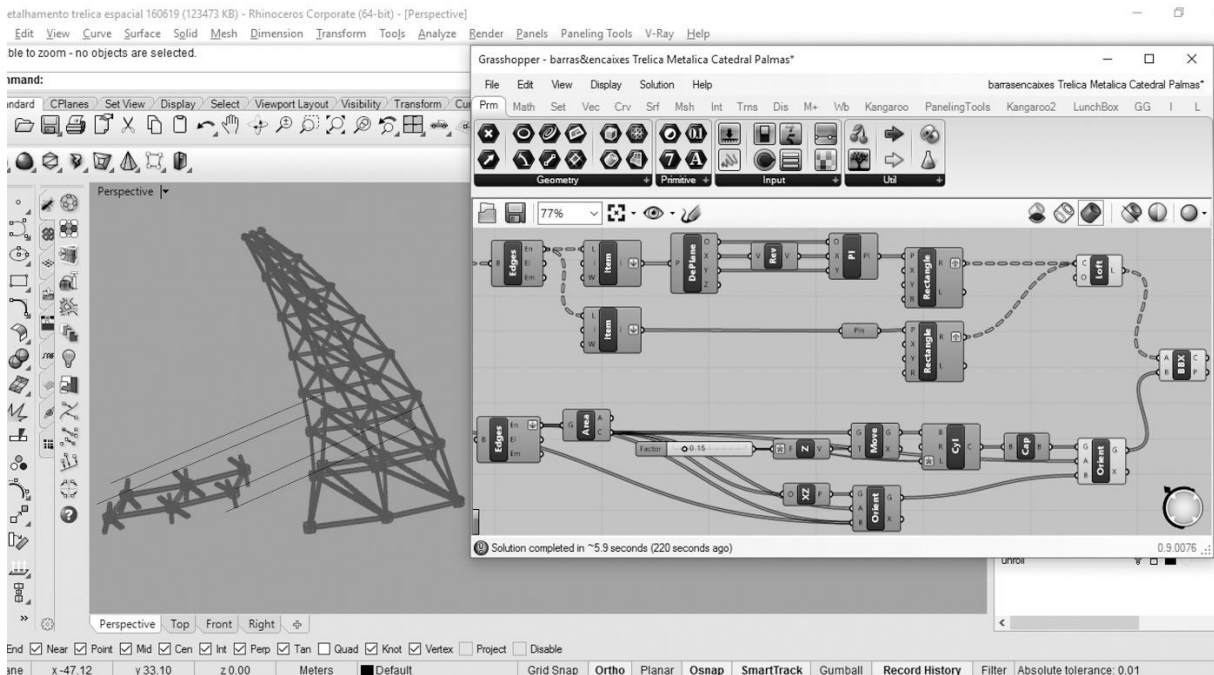


2016. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

A segunda decisão foi trabalhar apenas com a seção de maior vão da estrutura (Fig. 56), basicamente para poupar os algoritmos de cálculos extensos, retirando-a do contexto vizinho. A partir daí, iniciou-se o desenvolvimento de novos algoritmos para parametrização dos elementos que compõem a treliça. A primeira tarefa foi criar um algoritmo de interseção entre as barras e os encaixes (Fig. 57), de forma a gerar os

planos tanto de gravação das chapas a serem calandradas para os encaixes, quanto de recorte das chapas a serem dobradas para os conectores. Esse algoritmo possibilita alterar tanto o tipo de perfil das barras – permitindo adequar qualquer tipo de perfil fornecido, seja ele I, Z, T, ou tubulares redondos, quadrados, retangulares –, quanto propriedades dos encaixes, como diâmetro da peça e espessura da chapa.

Figura 57 – Definição *Grasshopper*® para interseção entre barras e encaixes.



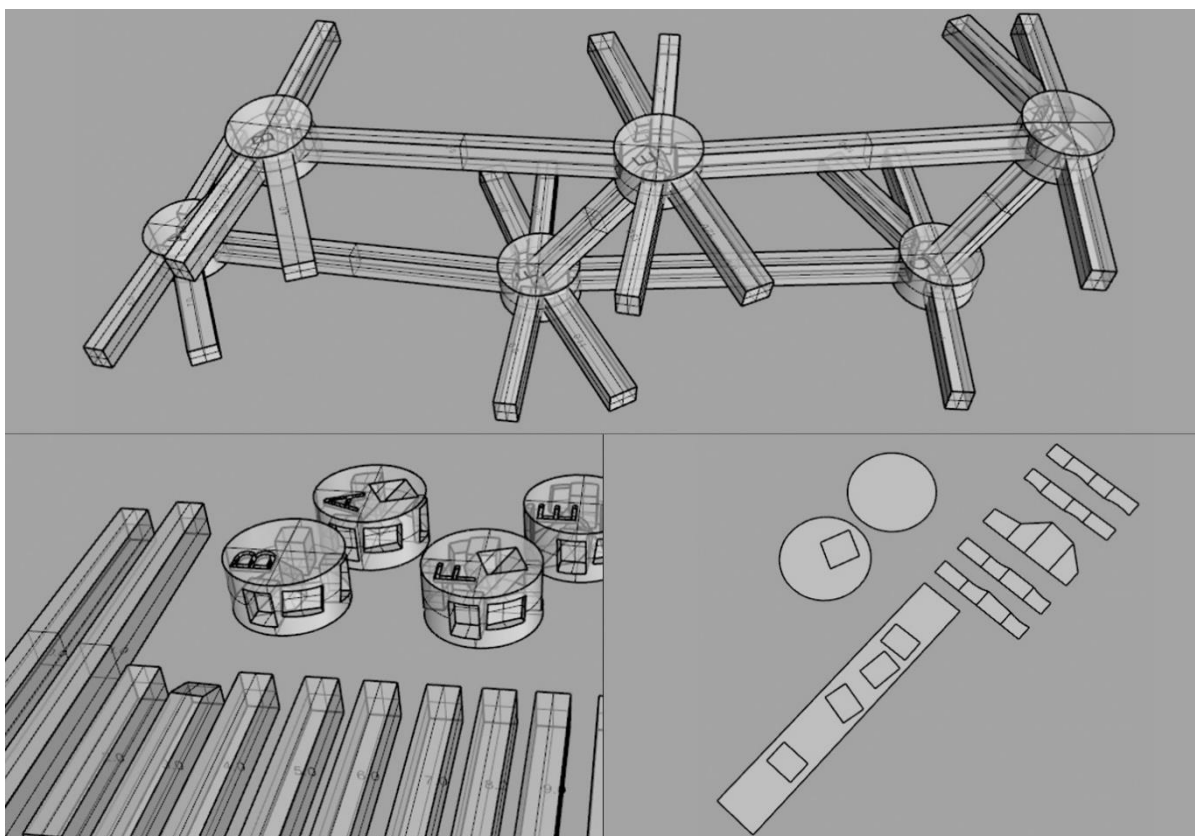
2016. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

A segunda tarefa foi montar um algoritmo para identificação automatizada de todas as peças, sejam barras ou encaixes, e planificação de todas elas. Tal processo simula a fabricação com os materiais reais em escala 1:1, uma vez que planifica as geometrias das peças separadas tanto dos encaixes, quanto dos conectores. Portanto, a maior parte do processo de produção dos encaixes seria personalizada de forma automatizada (Fig. 58), com exceção da última etapa, que seria a montagem e soldagem das partes constituintes, a ser produzida artesanalmente, peça por peça.

Durante essa segunda etapa do estudo de detalhamento, houve a produção de um protótipo em escala 1:25, constituído por peças separadas, montadas entre si com encaixe simples. O modelo palpável (Fig. 59) foi fabricado pelo método de adição de plástico *PLA*, utilizando-se uma impressora doméstica de pequeno porte, da marca *UP 3D*®. Kolarevic (2001, p. 272, tradução nossa) define a fabricação aditiva como o

processo que “[...] envolve a formação gradual pela adição de material camada a camada [...]”.⁴¹ Portanto, foram modelados vinte e sete barras, e seis encaixes, que foram montados entre si manualmente, configurando, assim, a maquete de uma parte da treliça metálica idealizada no projeto de arquitetura.

Figura 58 – Processo de planificação dos elementos de encaixe das barras metálicas.



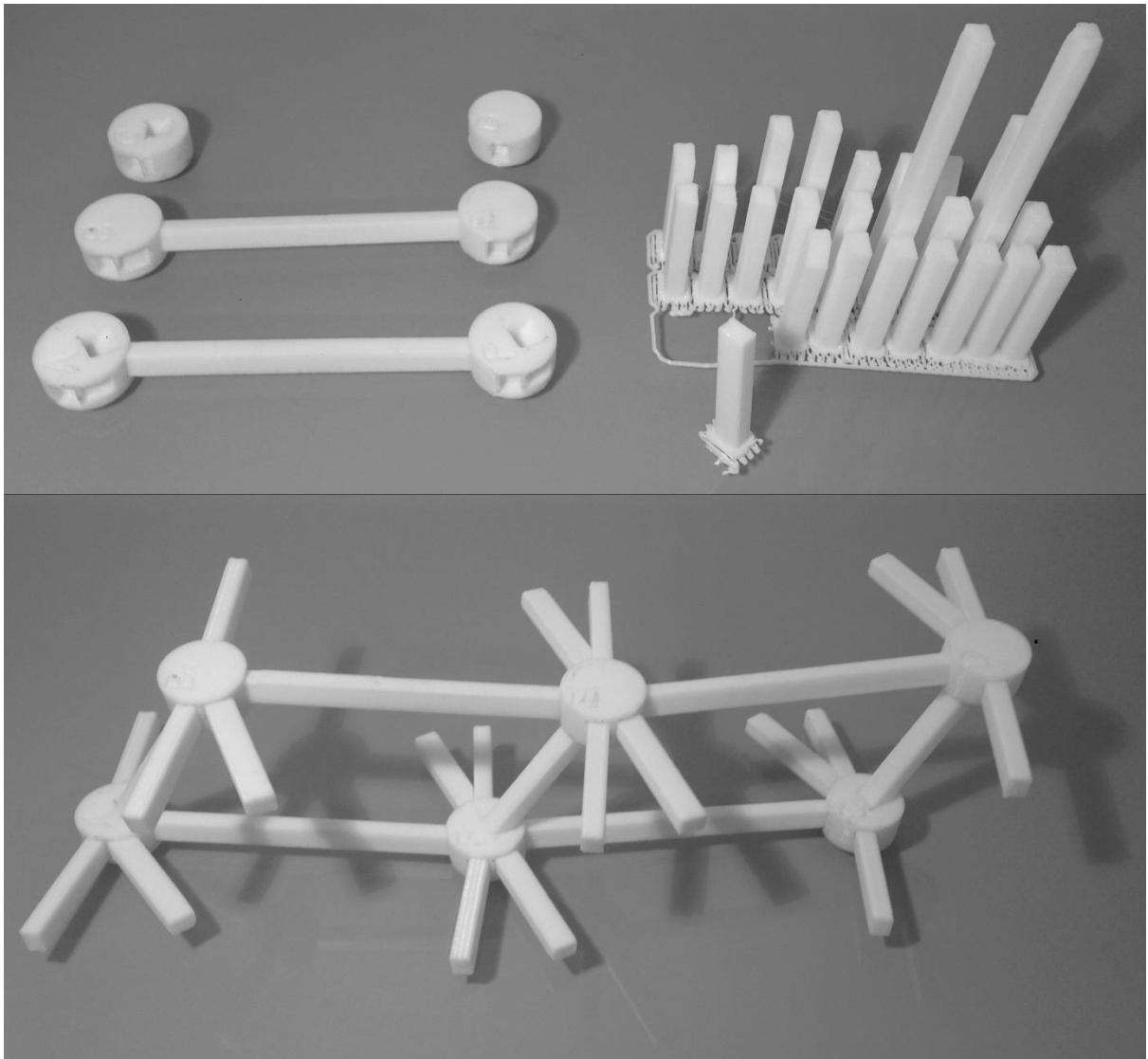
2016. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

2.1.4 – Resultados da aplicação da produção digital na Catedral de Palmas

O primeiro resultado foi um encadeamento de algoritmos orientados para a automatização de certas partes de um hipotético processo de fabricação da cobertura da Catedral de Palmas. Tais algoritmos foram desenvolvidos para a interseção, identificação, planificação, gravação e corte bidimensional de peças. Os resultados gerados foram testados por meio de simulações funiculares e de protótipo em escala reduzida.

⁴¹ Original: “[...] involved incremental forming by adding material in a layer-by-layer fashion [...]” (KOLAREVIC, 2001, p. 272)

Figura 59 – Protótipo em plástico *PLA* da parte da treliça metálica escolhida para detalhamento, em escala 1:25.



2016. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Os algoritmos referidos possibilitaram a elaboração de um sistema generativo que permitiu, por sua vez, a evolução do processo de detalhamento estrutural, mantendo informações em constante transformação, independente de alterações que pudessem surgir durante o processo. Então, outro resultado foi o sistema generativo, produzido para organizar as informações para a construção.

O último resultado foi a previsão de um esquema básico de fabricação digital das peças em questão, considerando-se as aplicações tanto para modelos reduzidos, quanto para peças funcionais.

O conjunto desses resultados possibilitou compreender um processo de roteirização da produção digital, objetivando a automatização do máximo de etapas, desde o projeto à fabricação.

2.1.5 – Problemática da aplicação da produção digital no projeto arquitetônico

O presente estudo encontra-se em um estágio inicial do processo de detalhamento estrutural. Evidente que as poucas consultas de engenharia, promovidas ao longo dessa pesquisa, não abrangem um trabalho executivo completo. Todavia, a pretensão é a possibilidade de ainda simular com precisão a melhor distribuição de cargas, conforme a engenharia específica para o caso.

Considera-se, ao mesmo tempo, que o uso de outros *softwares* mais especializados em metalurgia, tais como *CATIA®* ou *Generative Components®*, possam encontrar soluções mais avançadas e atingir um nível de detalhamento mais aprofundado. O que seria ideal para processos de produção mais automatizados e que tenham à disposição maquinário mais desenvolvido.

No entanto, o foco da especulação não está necessariamente no uso do melhor *software*, nem na definição da melhor solução de engenharia, mas na construção de um raciocínio executivo que aproveite mais do potencial industrial. Nesse sentido, discute-se a incorporação de ferramentas digitais nos processos arquitetônicos, para maior capacitação técnica dos arquitetos. A intenção é promover o uso de soluções personalizadas, uma vez que tecnologias capazes de lidar com esse tipo de demanda estão à disposição para a construção civil, no âmbito brasileiro. Em outras palavras, independente da utilização do *software Rhinoceros®*, ou do estágio em que se encontra o projeto de engenharia, o objetivo deste experimento é considerar um sistema que possa se adaptar ao longo de todo o processo, desde a concepção arquitetônico até os estágios construtivos.

Mesmo que o modelo geométrico fosse alterado, por exemplo, devido a ajustes das distribuições de cargas, ou se trechos da treliça necessitassem de reforços por meio do acréscimo de novas barras, subdividindo-se ainda mais os vãos, compreende-se que o sistema generativo desenvolvido possibilitaria atualizar todas as informações automaticamente, independente da modificação dos parâmetros. Ainda, compreende-se que o desenvolvimento de um algoritmo de produção sempre pode melhorar, atingindo níveis cada vez maiores de automatização.

O sistema generativo é capaz de gerar as formas arquitetônicas a partir de informações, tais como: condicionantes ambientais, econômicas, construtivas etc. Observando mais especificamente a prática profissional, Marina Rodrigues de Oliveira e Márcio Minto Fabricio (2011) apresentaram um conceito equivalente ao de sistema generativo ao mencionarem o “modelo interativo” (p. 460) como resultante do projeto paramétrico. Alinha-se com os referidos autores quando propõem que “o uso crescente de tecnologias *CAAD* (*computer aided architectural design*) proporciona o desenvolvimento de ferramentas que contribuem para o aumento da produtividade e a melhoria da qualidade dos projetos” (OLIVEIRA; FABRICIO, 2011, p. 467). De fato, contribui também para a melhoria da construção, montagem, pré-fabricação, e maior precisão em etapas artesanais, desde que não sejam utilizadas em detrimento do conhecimento arquitetônico.

Para exemplificar a flexibilidade do sistema generativo, considera-se, por exemplo, que o esquema de identificação das peças se encontra em estágio primário, porque foi testado apenas no protótipo. Prevê-se que todos os conectores precisam ser identificados, bem como todas as chapas que compõem os encaixes, além das barras. Tal esquema deveria, de fato, ser compatibilizado em conjunto com o fabricante, uma vez que a complexidade da fabricação de milhares de peças, em lotes separados, para posterior soldagem artesanal, deve ser programada com as escalas de produção da fábrica; entre outros fatores que não foram considerados aqui.

Ainda, o projeto de todas as peças pode ser melhor detalhado, já que as soluções adotadas aqui foram as mais pragmáticas. E, evidente, que o presente estudo se restringiu apenas ao detalhamento da treliça metálica, restando ainda os detalhes das esquadrias de alumínio, da vidraria e do forro, que dariam acabamento refinado à estrutura um tanto bruta.

De qualquer maneira, por mais simples sejam as soluções adotadas aqui, já se apresenta o potencial de utilização das metodologias de produção digital em arquitetura e como elas podem constituir solidez para o profissional que precisa solucionar problemas complexos de construção. A quantidade de peças a serem detalhadas tornaria inviável o projeto individual de cada uma delas. Portanto, torna-se necessária a automatização por meio do projeto paramétrico.

Ressalta-se, ainda, a importância da prototipagem rápida nesse processo, como uma etapa de auxílio nas tomadas de decisão do projetista. A execução de um

modelo palpável lança o desafio de pensar construtivamente, obrigando o profissional a pensar em soluções que sejam viáveis construtivamente.

Beatriz Carra Bertho [et al.] (2011) demonstraram essa ideia por meio da aplicação de protótipos em escala reduzida no canteiro de obras para visualização por parte de operários. As entrevistas que os autores realizaram, diretamente com construtores e trabalhadores do campo da construção civil, demonstraram, por exemplo, que o protótipo “seria muito útil no canteiro, pois permite a visualização de detalhes que não podem ser compreendidos com a planta 2D” (BERTHO [et al.], 2011, p.453-454). Concorde-se também com Regiane Pupo e Maria Gabriela Caffarena Celani quando consideram que a prototipagem rápida é uma ferramenta que permite “ultrapassar os limites da complexidade, alcançando com muito mais eficiência as necessidades e exigências do ser humano” (PUPO; CELANI, 2011, p. 484).

Enfim, o que se pretende discutir é a maneira como o papel do arquiteto pode se ampliar devido à utilização de métodos de roteirização do projeto, tornando-o cada vez mais presente, por exemplo, durante as etapas de concepção e detalhamento estrutural. O escopo de trabalho se amplia, bem como a responsabilidade técnica, em um processo de requalificação profissional, o que possibilita vislumbrar como a arquitetura pode evoluir, em termos de suas aplicações dentro do campo da construção civil, e como essa evolução tende cada vez mais à interdisciplinaridade.

No entanto, deve se ter em vista o contexto nacional onde as tecnologias mais avançadas estão localizadas em pontos específicos, não sendo bem distribuídas pelo território. Mesmo assim, por mais básico seja o estágio de avanço tecnológico de determinada localidade, o que se percebe é ainda uma subutilização dos recursos, por parte dos projetistas e da construção civil em geral. O modelo padronizado é o que prevalece na maioria dos casos. Todavia, o interessante a se notar é o potencial de aplicação desse tipo de tecnologia mesmo para soluções que não envolvam a complexidade geométrica.

2.1.6 – O papel da produção digital na prática de arquitetura

De um ponto de vista cultural específico, procurou-se esclarecer a questão do uso da parametrização no contexto da arquitetura, especulando-se sobre as possibilidades de sua utilização para desenvolvimento de projetos, com o intuito de auxiliar a compreensão de como melhor abordar tal técnica em um contexto que

comumente opera utilizando meios de produção standardizados. Nesse sentido, este primeiro experimento sugere a personalização de elementos standard devido à necessidade de viabilizar a construção. Outro aspecto importante é que, apesar dos parâmetros aqui considerados terem sido definidos a partir de dimensões padronizadas, a forma definida originalmente por Paulo Henrique Paranhos não foi comprometida. Portanto, uma vez acessível aos profissionais, acredita-se que o uso da parametrização pode se tornar um meio capaz de transformar a maneira como se projeta o espaço arquitetônico.

De um ponto de vista abrangente, acredita-se que o paradigma moderno pode se favorecer do uso da parametrização em ambos os lados da sua relação mais evidente: forma e função. Aspectos formais são experimentados e viabilizados por meio de características construtivas, selecionando-se automaticamente a melhor alternativa dentro de um conjunto de condicionantes. Já aspectos funcionais são imediatamente verificados, como distribuição de cargas estruturais, conforto térmico e insolação.

Com isso, compreende-se uma maneira viável de avançar os métodos produtivos da construção civil, adaptando-se naturalmente as relações entre espaço e habitantes, por meio da parametrização, que é capaz de coordenar simultaneamente o máximo de condicionantes possíveis, possibilitando que o projeto corresponda de maneira mais eficiente ao ambiente e suas condições socioeconômicas envolvidas.

As escolas de arquitetura e engenharia deveriam se alinhar sobre a adoção da produção digital e se apropriar do avanço para funcionarem em concordância com aquilo que a cultura de construção civil pode oferecer em termos tecnológicos. Mesmo que tais processos já sejam utilizados há aproximadamente quatro décadas em países mais desenvolvidos industrialmente, como EUA e Espanha, considera-se que ainda não sejam bem organizados socialmente em situações econômicas menos favorecidas. No entanto, apresentam o potencial de se tornarem cada vez mais palpáveis e acessíveis aos projetistas e construtores nas próximas décadas. Kolarevic (2003), aponta alguns precursores do uso de tecnologias digitais para a construção civil:

A fresadora CNC multi-eixos é uma das mais antigas tecnologias de fabricação digital. Experimentos iniciais na utilização de máquinas fresadoras CNC para se produzir modelos arquitetônicos foram realizados no início dos anos 1970 no Reino Unido. Grandes firmas de arquitetura nos Estados

Unidos, como Skidmore, Owings and Merrill's (SOM) office in Chicago, utilizaram extensivamente máquinas fresadoras CNC e cortadoras a laser para produção de modelos arquitetônicos e estudos de montagem construtiva. Máquinas fresadoras automatizadas foram utilizadas no final dos anos 1980 e nos anos 1990 para se produzir componentes construtivos, tais como as pedras para a *Cathedral of Saint John the Divine* em Nova Iorque e colunas para a *Basílica da Sagrada Família* em Barcelona⁴² (KOLAREVIC, 2003, p. 35, tradução nossa).

Esse repertório tecnológico já vem sendo divulgado e ensinado, mesmo que ainda de forma não intensiva, portanto, não se trata mais de apenas prover ensino, mas, sobretudo, que a prática possa se tornar frequente para arquitetos e designers. Com isso, espera-se que a construção de arquitetura possa se relacionar melhor com as tecnologias existentes; que os métodos de projeto arquitetônico possam incorporar tais técnicas e processos de produção digital; e que as decisões de trabalho possam se amparar em comprovações científicas, requalificando, assim, a atividade profissional, em referência, por exemplo, aos pesquisadores da Universidade de Stuttgart, que desenvolveram um método de projeto baseado em desempenho.

⁴² Original: "The CNC multi-axis milling is one of the oldest digital fabrication technologies. Early experiments in using CNC milling machines to produce architectural models were carried out in early 1970s in the United Kingdom. Large architectural firms in the United States, such as Skidmore, Owings na Merrill's (SOM) office in Chicago, have used CNC milling machines and laser cutters extensively in the production of architectural models and studies of construction assemblies. Automated milling machines were used in the late 1980s and in the 1990s to produce construction componentes, such as stones for New York's Cathedral of Saint John the Divine and columns for the Sagrada Família Church em Barcelona." (KOLAREVIC, 2003, p. 35). As marcações no texto traduzido são do autor.

CAPÍTULO 3

3.1 – Segundo experimento: produção digital de estruturas leves

Apresenta-se, neste capítulo, alguns exemplos da produção espacial envolvida em três eventos promovidos por diferentes organizações, na cidade de Brasília – DF. O papel da arquitetura foi materializar sensações, experiências e fenômenos para os participantes. Essa produção define um tipo de urbanismo produzido por grupos de pessoas que utilizam com criatividade os espaços públicos da cidade. Limitados por prazos e orçamentos mínimos, e localizados em um lugar onde a alta tecnologia é escassa, os processos produtivos necessitam do trabalho artesanal. O principal objetivo é analisar como o uso de tecnologias avançadas pode corresponder a esse tipo de situação.

3.1.1 – Contexto da investigação

Há alguns anos, o governo de Brasília – DF organizou uma legislação para a ocupação dos espaços públicos da cidade, como parte de um plano de preservação conhecido como Plano de Preservação do Conjunto Urbanístico de Brasília – PPCUB, 2012. Mesmo antes disso, diferentes grupos de produtores que trabalham com grandes eventos já ocupavam diferentes partes da cidade para promover festivais, concertos e eventos culturais.

Esses produtores visualizaram uma oportunidade de ocupar a cidade de maneira criativa, também agitando a economia local e, possivelmente, contribuindo para torná-la um lugar melhor. Na verdade, esse tipo de ocupação do espaço público, com eventos que trazem cultura, comida, música e comércio para a sociedade, está ajudando a tornar Brasília uma cidade mais viva, em relação à interação social em seus espaços urbanos (FRÚGOLI JR., 1995).

Reconhecendo o potencial do uso de estruturas leves como cenografia para tais eventos, o Coletivo *Voxel Lab* produziu, entre 2016 e 2017, um conjunto de trabalhos que introduziram no contexto descrito um fator tecnológico à prática de arquitetura, ao atuar desde a concepção até a construção utilizando tecnologias digitais.

Apresentar-se-ão três dessas estruturas: a primeira, intitulada "O Móvel"; a segunda, um fechamento em papelão; a terceira, um *parklet* multifuncional. Todos os trabalhos foram resultados da aplicação empírica de uma teoria fenomenológica

discutida anteriormente às sessões de trabalho, conduzindo a compreensão da intervenção urbana como elemento de diálogo com a cidade.

3.1.1.1 – O coletivo

O *Voxel Lab* é um grupo de arquitetos que trabalha em várias frentes, cruzando arquitetura e tecnologia, do design de interiores à intervenção urbana. A organização das pessoas dentro do coletivo é flexível. Especificamente para a frente de trabalho de intervenção urbana, a equipe incluiu um núcleo fixo de cinco pessoas, em um total de dez, envolvidas em alguns dos processos que serão descritos.

Durante o tempo de trabalho dos três projetos a serem apresentados, a equipe incluiu profissionais e estudantes com treinamento voltado para a produção técnica, com foco em inovações tecnológicas. O tipo de trabalho foi colaborativo, sem hierarquias além do nível de colaboração de cada participante.

O processo de trabalho da equipe foi o projeto paramétrico, embora o desenho à mão livre e a modelagem ponto a ponto tenham sido instrumentos importantes durante as etapas de criação. A equipe trabalhou com modelagem algorítmica e prototipagem rápida para o desenvolvimento e detalhamento dos projetos, sempre com a intenção de encontrar um sistema generativo que permitisse sua evolução dentro de parâmetros pré-determinados. Todos os projetos foram desenvolvidos com o *software Rhinoceros®* e seu *plug-in Grasshopper®* em conjunto com alguns *add-ons*, como *Kangaroo®*, *Hoopsnake®*, *Lunchbox®*.

3.1.2 – Procedimentos metodológicos

Este segundo experimento especula sobre a aplicação do projeto paramétrico para resolução de problemas construtivos reais, voltados para execução e montagem de estruturas leves. Durante aproximadamente um ano e meio, desde o início do segundo semestre de 2016 até o fim do segundo semestre de 2017, a equipe se concentrou na produção de diferentes projetos, no entanto, aqui serão apresentados apenas três projetos escolhidos pela maior adequação aos métodos propostos.

Sistematicamente, desenvolveu-se uma abordagem simples para todos os trabalhos: usar o máximo de tecnologia inovadora possível para responder a um problema de construção. Nessa perspectiva, utilizou-se da modelagem algorítmica para projetar todos os trabalhos. Em vez da representação por meio da planta baixa

e do corte, usou-se o computador para entender o processo de construção. Nesse caso, a representação bidimensional não seria suficiente para compreensão das estruturas a serem construídas, ou seja, o sistema de interpretação visual em plantas e cortes, comum na prática arquitetônica, não seria eficaz para solucionar a construção das peças. Sobre o “problema da representação do espaço”, Bruno Zevi (1996, p. 30) aborda a importância de se melhorar os meios de visualização arquitetônica. Nesse caso, a visualização tridimensional na tela do computador foi essencial.

Também da mesma perspectiva, manteve-se a tentativa de automatizar o maior número possível de processos construtivos, sejam eles mecanizados ou digitais. Portanto, a análise diferencia os meios de produção, buscando verificar o uso real do computador nas ações comuns de construção.

Após esse período de produção, todos os trabalhos foram analisados qualitativamente, na perspectiva de Robert E. Stake (2003), por considerar os processos empíricos de projeto e construção das estruturas mencionadas como os principais alvos para a reprodução do conhecimento. Portanto, o estudo concentrou-se na análise de como o projeto paramétrico se relaciona com o processo de execução, seja fabricação digital, mecanizada ou produção artesanal.

O argumento é que o projeto paramétrico representa o próprio processo de construção, ou seja, que o modelo algorítmico é capaz de demonstrar o processo de construção específico por meio de suas funções. Existem projetos para braços robóticos e existem aqueles para meios de produção artesanais.

Os algoritmos a serem apresentados neste capítulo não são de minha única autoria, fazem parte do acervo de trabalhos do Coletivo *Voxel Lab* e serão aqui apresentados para dar sentido aos procedimentos metodológicos que compõem esta tese. As descrições abordarão a maneira como os projetos se adaptaram aos processos de construção, a fim de orientá-los para uma maneira mais eficiente de produção.

A análise dos projetos foi organizada em duas etapas, a primeira de investigação da relação entre projeto e execução e a segunda de observação do próprio processo de construção. Como as três estruturas leves são diferentes por concepção, as etapas da análise variam de projeto para projeto, mas mantendo a

lógica que começa com o projeto paramétrico e termina com um processo específico de fabricação e montagem.

Na medida em que a linha de pesquisa abordou os aspectos construtivos dos projetos, enfatizou-se aqui a descrição desses aspectos, uma vez que neste segundo experimento eles terão maior relevância, já que, de fato, se conseguiu construir estruturas simples, diferindo, assim, do primeiro e terceiro experimentos voltados para os aspectos de projeção arquitetônica.

3.1.2.1 – Trabalho no campo artístico

Antes de iniciar a produção dos projetos, o grupo se reuniu para uma série de leituras e conversas sobre filosofia da arte, com o objetivo de nivelar um pensamento comum sobre a orientação dos trabalhos. Ao trabalhar com arte, especialmente para uma equipe formada por arquitetos, surge a necessidade de uma adaptação em relação aos objetivos e funções do espaço final projetado. Nesse caso, refere-se a uma adaptação teórica para que a equipe envolvida pudesse produzir desde a concepção dos projetos, por meio de um pensamento que poderia levar ao questionamento de diferentes etapas da prática arquitetônica mais comum.

As leituras seguiram duas linhas básicas. A primeira enfocou alguns autores que pensaram a fenomenologia em relação à arte e arquitetura (HEIDEGGER, 2010; MERLEAU-PONTY, 1966; PALLASMAA, 2011). A segunda linha seguiu dois autores que ajudaram a orientar uma lógica sobre produção tecnológica em arte e arquitetura (BENJAMIN, 2012; SCHUMACHER, 2011). Tais leituras serviram tanto para conectar o coletivo em um pensamento que conduziu o processo de projeto, quanto para despertar um senso artístico nas pessoas envolvidas, uma direção para a produção artística.

O tema da fenomenologia foi importante para a orientação dos projetos. Desde o início, já se pensava em arquiteturas que pudessem interagir com o público, criando experiências sensoriais. A teoria fenomenológica responde à questão sensorial e vincula a arte como um dos meios de expressão mais acessíveis ao ser humano (HEIDEGGER, 2010).

Martin Heidegger (2010), em sua interpretação da obra de Friedrich Nietzsche, apresenta a tese de que a modernidade vive a estética do artista. Ao invés de uma estética objetiva, baseada no objeto, na própria obra de arte, ou em uma estética

subjetiva, ancorada no sujeito que percebe a obra, a estética do artista é aquela expressada pelo próprio produtor, por meio de suas proposições. O produtor de arte, socialmente autônomo, não mais dependente do mecenato, produzindo um discurso com sua própria voz, ou expressão artística, é o ente que cria o fenômeno artístico.

Maurice Merleau-Ponty (1966) analisa a experiência artística quando dá o exemplo da produção de Paul Cézanne, que expressa, em sua pintura, traços de sua psicologia. O pintor representava o mundo circundante associando aspectos de sua mente peculiar e não simplesmente pintando o que observava. O artista francês criou uma experiência sensorial para seus espectadores, ao distorcer a aparente realidade em novas cores, formas e composições.

O fenômeno da percepção espacial é analisado por Juhani Pallasmaa (2011), referindo-se a uma compreensão ampliada da arquitetura, definindo-a como a arte de conectar o ser com o mundo por meio dos sentidos. Nesse sentido, a essência das proposições arquitetônicas seria estabelecer relações sensoriais entre o espaço projetado e seus usuários. A visão não é mais o principal sentido de apreensão espacial, misturando-se os sentidos, visão, audição, tato, olfato, em um processo sinestésico.

Apesar da abordagem restrita a apenas três autores que propuseram sobre fenomenologia, a intenção foi incluir um raciocínio completo e até cronológico sobre o tema. Partindo-se da compreensão do artista como um fenômeno de expressão de suas próprias experiências e sensações, passando pela análise de como ocorre a apreensão do mundo, não se limitando à visão e conectando-a à psique do indivíduo, para, finalmente, compreender como ocorre a fenomenologia dos espaços.

Por outro lado, ao abordar a questão da produção em arte, concentrou-se na visão de Walter Benjamin (2012) que critica a mera exploração técnica de ferramentas que se popularizam na sociedade. A banalidade da arte ocorre com a reprodutibilidade técnica e o autor a considera por meio da fotografia e do cinema, ou seja, dos instrumentos fotográficos e cinematográficos.

Ao transpor tais críticas para a contemporaneidade, entende-se que o computador é um instrumento cujo uso indiscriminado pode levar a uma prática vazia e desprovida de significados. Schumacher (2011) propõe o uso computacional para alcançar a *autopoiesis* da arquitetura por meio do que ele define como parametricismo. Nesse sentido, a possibilidade de parametrização do sistema

espacial composto pela arquitetura está associada a estudos de comportamento, fluxos de movimento e, por exemplo, conforto ambiental.

A dificuldade que persiste é identificar os limites dessa arquitetura autoconstruída, pois para alcançá-la é considerado o uso de tecnologias avançadas. No entanto, essas tecnologias geralmente são inacessíveis em contextos de baixa economia, resultando em produções artesanais que ocupam a maior parte do processo de construção. Com isso, surge um argumento, sobre os limites de viabilidade desse tipo de produção arquitetônica.

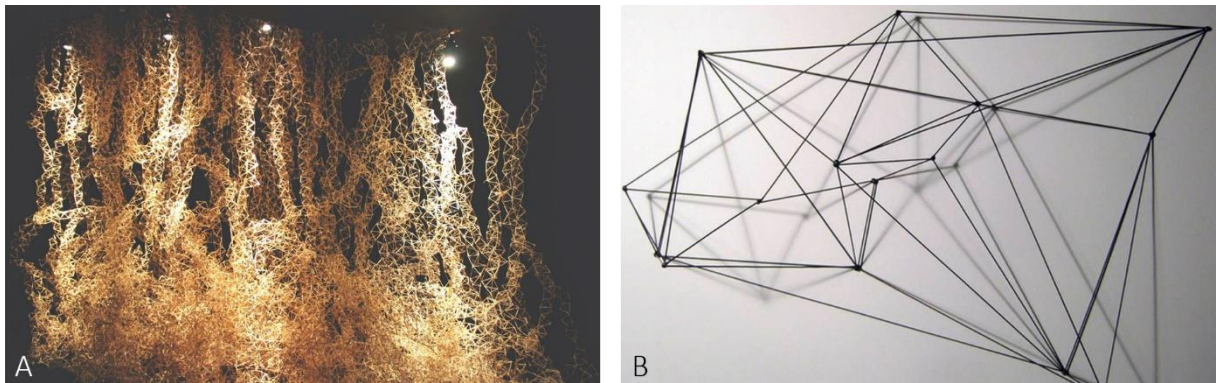
Conduzir uma crítica ao uso indiscriminado da tecnologia é imprescindível, tendo em vista as condições econômicas apresentadas no contexto. A tecnologia não pode substituir as decisões de projeto e a viabilidade dos resultados pretendidos e, por si só, é vazia de sensações e experiências sensoriais. Portanto, dentro deste experimento, o uso de processos computacionais pode variar em quantidade, dependendo do tipo de material, e em qualidade, de acordo com o tipo de processo de produção.

3.1.3 – Primeira estrutura leve: O Móvel

Após as leituras teóricas que nivelaram o pensamento do coletivo em relação ao trabalho artístico, foram executadas três estruturas leves para cenografia de eventos em Brasília – DF. Para o primeiro trabalho, a equipe do *Voxel Lab* se reuniu durante três semanas para projetar uma estrutura que pudesse ser alterada, essencialmente móvel, para um festival de música local. A configuração proposta se consistiu em barras de alumínio esbeltas, formando uma treliça estrutural flexível do ponto de vista de sua montagem.

A ideia principal foi criar uma estrutura transformável que pudesse assumir diferentes características ao longo dos dias do festival. O processo de concepção foi intensivo e observou muitas referências, apresentam-se aqui a obra de Julia Castagno intitulada “Modelo para a Sobrevivência” e a escultura “*Untitled K*” de Andrew K. Green (Fig. 60). Como foi o primeiro trabalho artístico do coletivo, envolveu muitas negociações sobre a forma, a montagem e a escolha dos materiais construtivos, até se alcançar uma proposta que sintetizasse a ideia principal.

Figura 60 – Referências para o projeto “O Móvel”.



A – Crédito da imagem: Julia Castagno.

B – Crédito da imagem: Andrew K. Green.

Figura 61 – Protótipos iniciais produzidos artesanalmente para “O Móvel”.



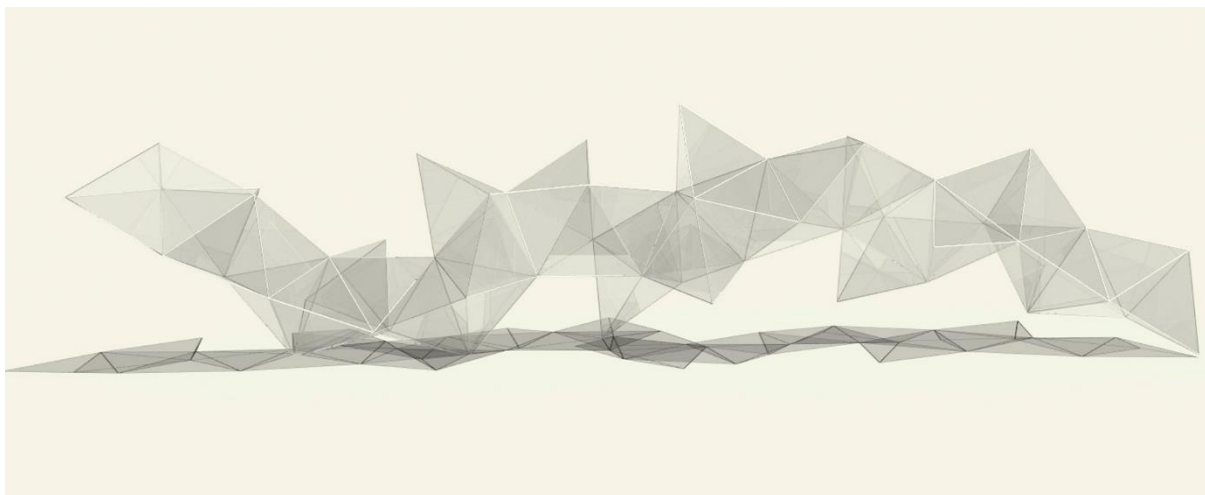
2016. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

A partir dessa fase inicial de concepção, chegou-se à proposta de um módulo piramidal em treliça que se repetiria, como uma forma de racionalizar a construção, e, para tanto, foi executado um protótipo, usando seis barras de alumínio de meia polegada, cada uma com um metro de comprimento, interligadas com arame. Propôs-se, também, um esquema de envelopagem do módulo por meio de plástico filme que adere às barras de alumínio e cria uma superfície que pode ser pintada. (Fig. 61)

A partir desse módulo, a equipe projetou uma primeira definição algorítmica no *Grasshopper*® para multiplicação de pirâmides, sempre a partir de uma das faces da pirâmide anterior, em um processo que criou novas ramificações, mas que tendia a

uma linearidade não uniforme (Fig. 62). O modelo algorítmico foi condicionado ao processo de definição anterior do módulo piramidal em treliça de alumínio.

Figura 62 – Renderização do modelo tridimensional gerado pela primeira definição *Grasshopper*® para “O Móvel”.



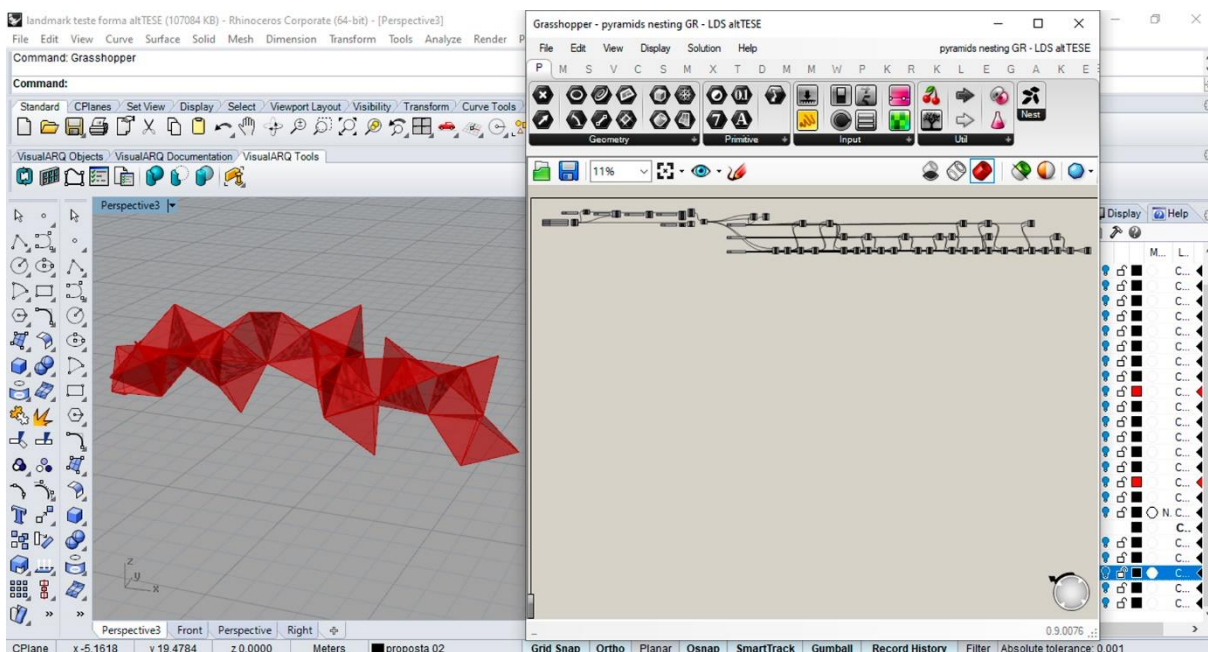
2016. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

O modelo algorítmico ajudou a encontrar a melhor forma para a estrutura, mas, principalmente, possibilitou deduzir um método de montagem sistemático, através da simples visualização das pirâmides que apareciam uma a uma em frente à face triangular precedente, conforme mudança de parâmetros no quadro de definição do *Grasshopper*®. Este modelo algorítmico, no entanto, foi feito gradualmente, escolhendo-se a origem da nova pirâmide, por meio da visualização direta do modelo na tela do computador, escolhendo deliberadamente a face específica de onde a pirâmide seguinte seria gerada. Não ocorreu um processo automático de geração da forma, mas sim uma escolha pirâmide a pirâmide até se encontrar a forma final da estrutura. Durante este processo as escolhas estéticas foram orientadoras para a decisão da forma final, diante de fatores como: altura da estrutura, os pontos em que se apoiaria, os vãos gerados para passagem de pessoas, áreas de aglomeração e o movimento enquanto expressão resultante desse sequenciamento dos módulos, sem perder a visualização do módulo piramidal de origem. (Fig. 63)

Como o processo se constituiu em uma série de repetições de um mesmo algoritmo de geração de uma nova pirâmide a partir de uma das faces triangulares da pirâmide anterior, tal algoritmo foi agrupado em um componente chamado *cluster*, que na tradução literal significa aglomerado ou agrupamento. É um recurso que otimiza o

próprio tamanho da definição *Grasshopper*® final, tornando-a mais simples para a manipulação. Desta forma, para cada nova pirâmide adicionou-se um novo *cluster* do mesmo algoritmo, alternando-se apenas o parâmetro de escolha da face triangular da própria pirâmide gerada, conforme uma seleção visual. (Fig. 64)

Figura 63 – Resumo da definição *Grasshopper*® para “O Móvel”.

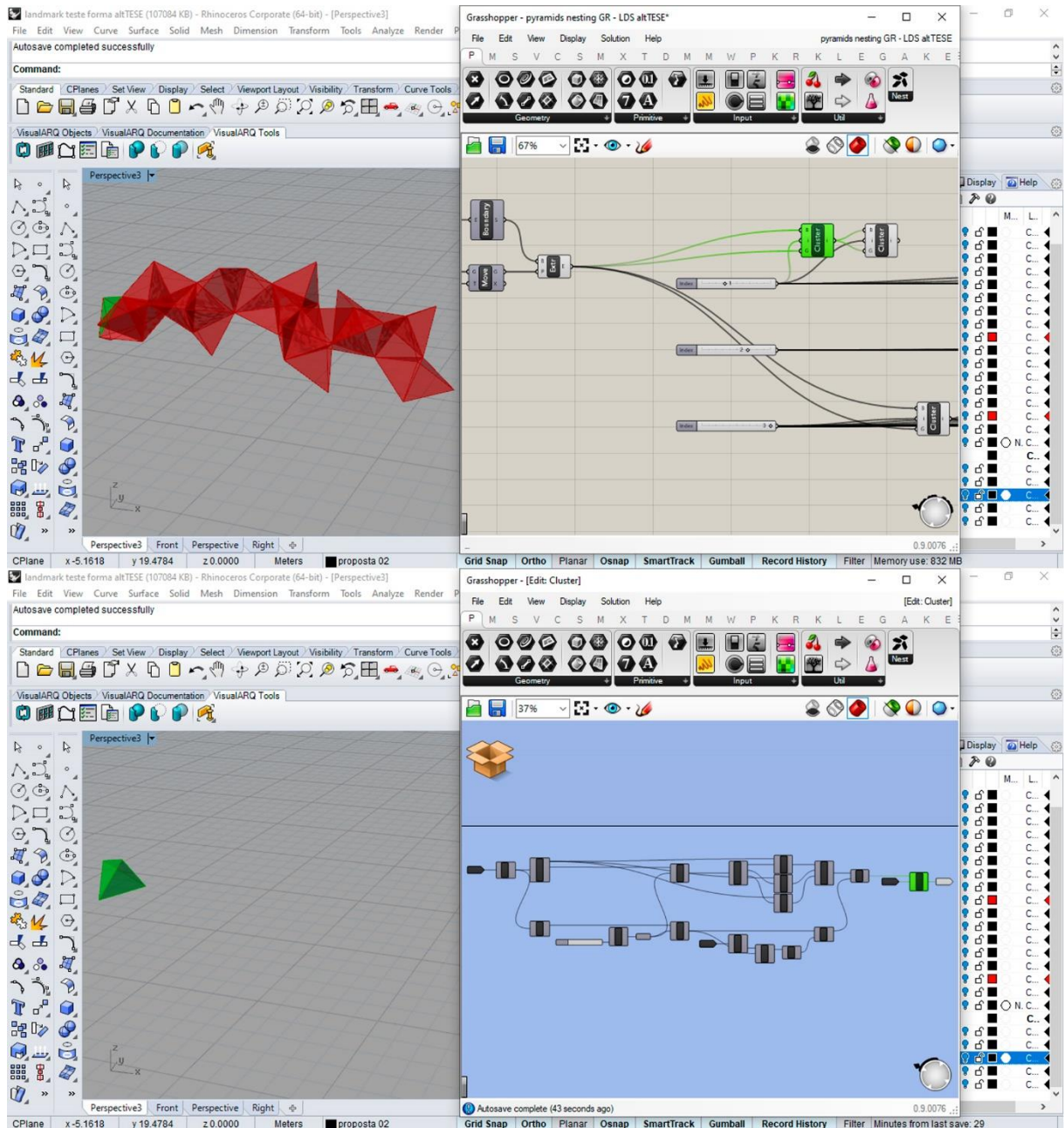


2016. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

Mesmo que se tenha utilizado o recurso do componente *cluster* no modelo algorítmico, buscou-se uma simplificação do processo para explorar maior automação na etapa de concepção da estrutura. Nesse sentido, uma segunda definição *Grasshopper*® foi criada pelo arquiteto Lucas De Sordi com a intenção de automatizar o processo, utilizando o *add-on HoopSnake*®, que permite *loops* de *feedback*. Em outras palavras, permite que uma forma previamente selecionada – a pirâmide inicial – possa ser duplicada indefinidamente, a partir de uma regra de geração – a criação de uma nova pirâmide a partir de uma das faces da pirâmide anterior – durante um determinado percurso escolhido, no caso uma curva modelada ponto a ponto previamente no *Rhino*®. No entanto, essa definição não foi utilizada, pois, apesar de automatizar o processo de geração da sequência de pirâmides, perder-se-ia a propriedade de criar novas ramificações, uma vez que as geometrias seriam geradas sempre ao longo da curva modelada ponto a ponto, não permitindo bifurcações do percurso. Embora esta segunda definição algorítmica não tenha

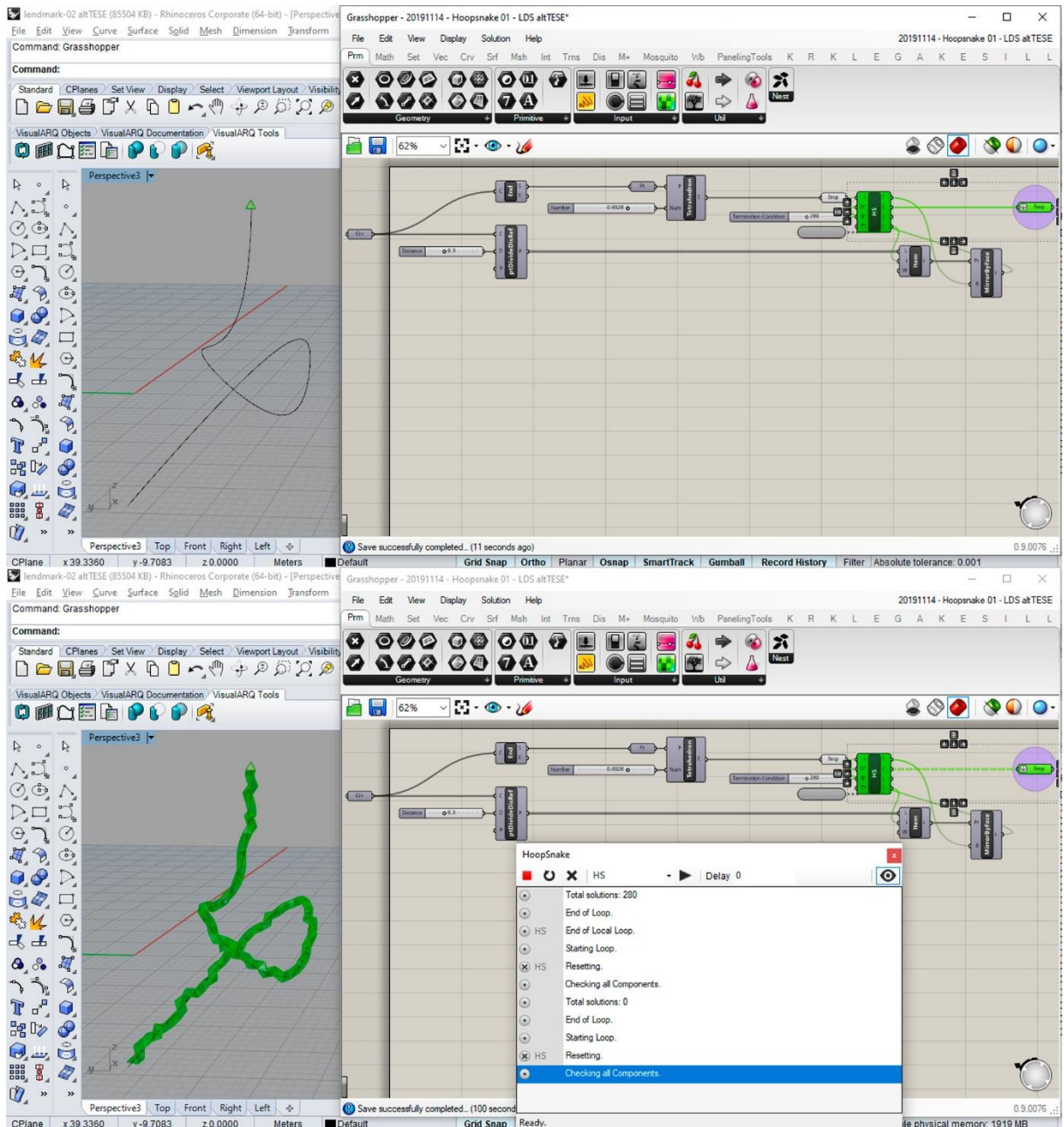
resultado na forma final escolhida, a experimentação com a sua modelagem foi um fator importante diante da orientação de se buscar a máxima automação dos processos. (Fig. 65)

Figura 64 – Renderização do modelo gerado pela definição *Grasshopper*®.



2016. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

Figura 65 – Processo automatizado de geração das pirâmides por *loops* de *feedback* utilizando o *addon* HoopSnake®.



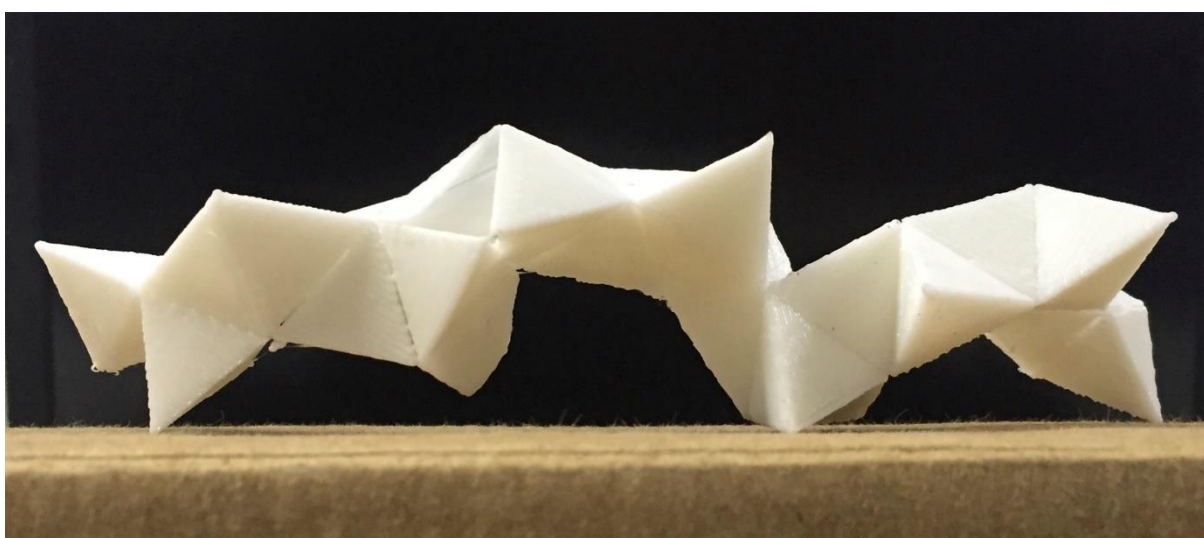
2016. Crédito da imagem: Lucas de Sordi.

Portanto, escolheu-se o modelo gerado pela primeira definição *Grasshopper*® e, a partir dele, foi impresso em 3D um protótipo em plástico branco *PLA* (Fig. 66). A geometria do modelo foi recuperada do *Grasshopper*® para o *Rhino*ceros® por meio do comando *bake*.

A partir da finalização do projeto iniciaram-se os trabalhos de execução. O corte dos perfis tubulares de alumínio foi usinado com uma serra mecânica, considerando

a divisão de cinco peças em um comprimento total da barra de seis metros, resultando em peças de aproximadamente um metro e vinte centímetros. Simplesmente o fornecedor não dispunha de outra tecnologia disponível para tal processo (Fig. 67). Além do corte, as barras foram perfuradas nas extremidades por uma retificadora instalada em um suporte vertical. Para isso, o coletivo projetou e imprimiu em 3D uma peça em plástico *ABS* para adaptar o ponto correto do furo no suporte de retificação, nivelando uniformemente a posição de todas as barras (Fig. 68).

Figura 66 – Protótipo em plástico *PLA* de “O Móvel”.



2016. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

Ao final, a estrutura modular foi envolvida com filme plástico, pois uma das condicionantes do projeto era criar uma superfície que pudesse receber projeção mapeada de vídeo, e foi elaborado um esquema de conexão por arame, conforme figura anterior (Fig. 61), ambas etapas artesanais do processo de montagem. O protótipo em plástico *PLA* (Fig. 66) auxiliou na percepção do volume da estrutura, que se evidenciou a partir do momento em que foi envelopada.

O coletivo considerou fazer as conexões com encaixes impressos em 3D, mas não houve orçamento ou prazo disponível para imprimir mais de cinquenta peças diferentes. De qualquer maneira, cada encaixe exigiria um sistema de conexão com as barras, o que aumentaria financeira e temporalmente. Por fim, também exigiria maior precisão no corte das barras, pois, nesse caso, as conexões seriam milimetricamente calculadas. Portanto, o esquema de conexão por arame constituiu-se na melhor solução.

Figura 67 – Processo de corte das barras de alumínio pelo fornecedor.



2016. Crédito da imagem: Coletivo Voxel Lab.

Figura 68 – Processo de perfuração das barras de alumínio, utilizando peça impressa em 3D para alinhar corretamente o limite da barra em relação à distância do furo.

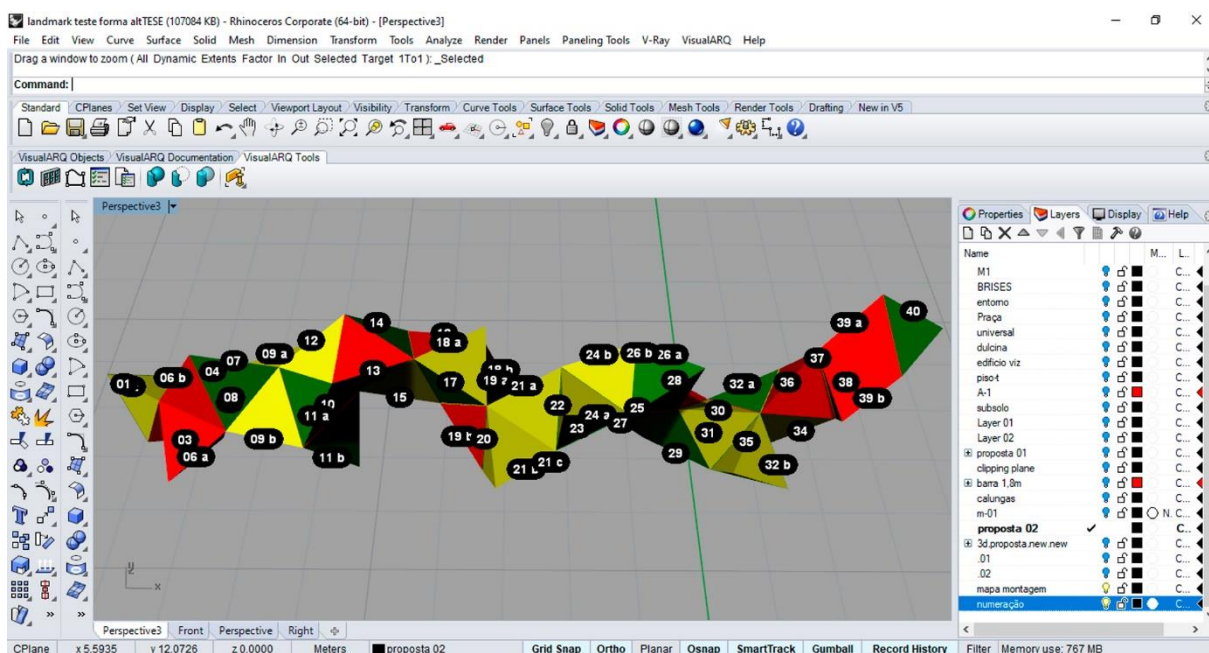


2016. Crédito da imagem: Coletivo Voxel Lab.

A primeira oportunidade de montar a estrutura “O Móvel” foi na Faculdade de Artes Dulcina de Moraes, projetada por Oscar Niemeyer, no Setor de Diversões Sul – SDS de Brasília, também conhecido como CONIC. O primeiro dia de montagem foi inteiramente dentro da galeria da faculdade, onde as primeiras sequências de pirâmides foram montadas a partir de um mapa tridimensional visualizado no *software*

Rhino®. O mapa apresentou a distribuição dos módulos piramidais a partir do processo de montagem descrito anteriormente, por meio de uma sequência de cores que se inicia com o verde, para primeira pirâmide, depois o amarelo, para aquelas pirâmides que são geradas a partir da primeira, e, sequencialmente, o vermelho, para aquelas pirâmides geradas a partir da segunda. Desse ponto em diante há uma repetição das três cores, com a criação de uma nova pirâmide verde a partir da vermelha anterior. Quando duas os mais pirâmides foram geradas a partir de uma única pirâmide, elas foram marcadas com a mesma cor da sequência, por exemplo, se duas pirâmides foram geradas a partir de uma pirâmide verde, elas foram marcadas com a mesma cor amarela. Todas as pirâmides foram numeradas para que se pudesse organizar a sequência de montagem. (Fig. 69)

Figura 69 – Mapa de montagem utilizado pela visualização na tela do computador.

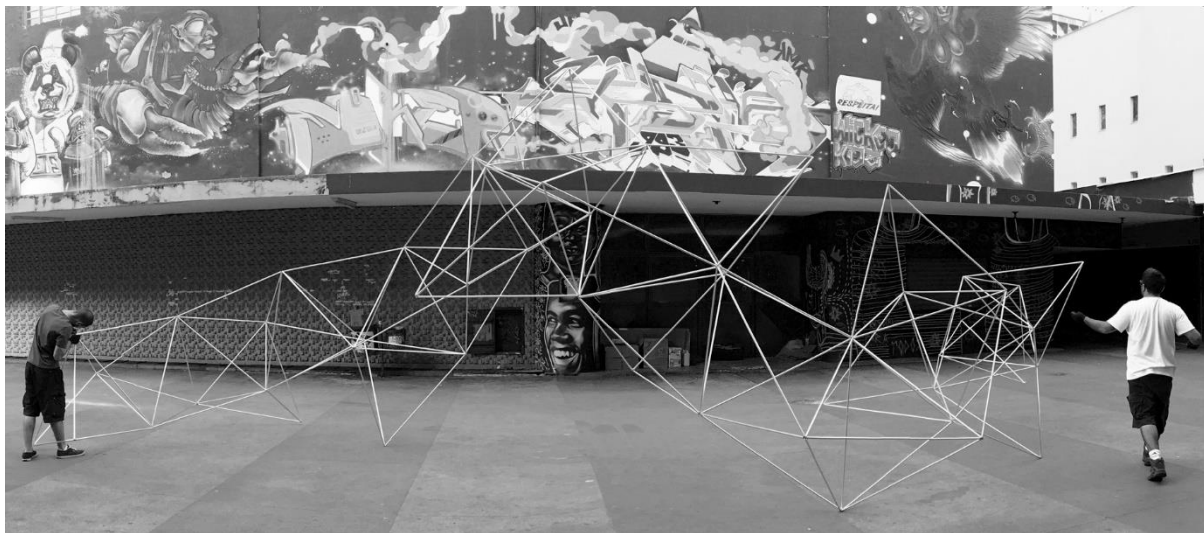


2016. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

O primeiro dia de montagem consistiu em muita experimentação, considerando que uma otimização do processo ocorreu durante a execução. Nesse dia, as primeiras barras cortadas e perfuradas foram montadas, interconectando-as com arame e, em seguida, aplicando uma camada de fita adesiva em cada conexão, com a intenção de proteger o futuro envelope de filme plástico contra possíveis rasgos.

As primeiras sequências de pirâmides montadas permaneceram na galeria até o primeiro dia do festival, segundo dia do processo de montagem. Nesse dia, elas foram removidas da galeria para um espaço maior, especificamente, a praça em frente à entrada do Teatro Dulcina de Moraes (Fig. 70). Ali, foram conectadas entre si e já permaneceram para exibição e interação com o público.

Figura 70 – “O Móvel” montado em frente ao Teatro Dulcina de Moraes.



2016. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

Após a conclusão dessa etapa, que transformou as três sequências separadas em uma única peça inteira, o plástico filme foi aplicado. Este processo consistiu em uma etapa exaustiva e demorada, devido ao trabalho manual e minucioso de conciliação entre os materiais. O envelope de plástico filme foi finalizado apenas no terceiro dia de montagem, no segundo dia do festival. Nesse dia, injetou-se gelo seco no envelope e a peça foi colorida com faixas de *LED*, criando uma ambientação durante a noite (Fig. 71). A ideia foi ampliar a experiência sensorial do público, uma vez que "O Móvel" ocupou o espaço de entrada do evento, onde os participantes se aglomeravam antes dos espetáculos musicais.

O quarto dia de montagem foi o mais simples, porque “O Móvel” não fez parte do cenário principal. O tema do terceiro dia de festival exigiu outros itens que não necessariamente dialogavam com a estrutura. Além disso, houve uma expectativa de público maior para ocupar a praça e era necessário liberar mais espaço para a concentração de pessoas em frente ao palco, localizado externamente ao teatro.

Portanto, a peça ficou posicionada em um local menos acessível, mas ainda completamente montada e envelopada.

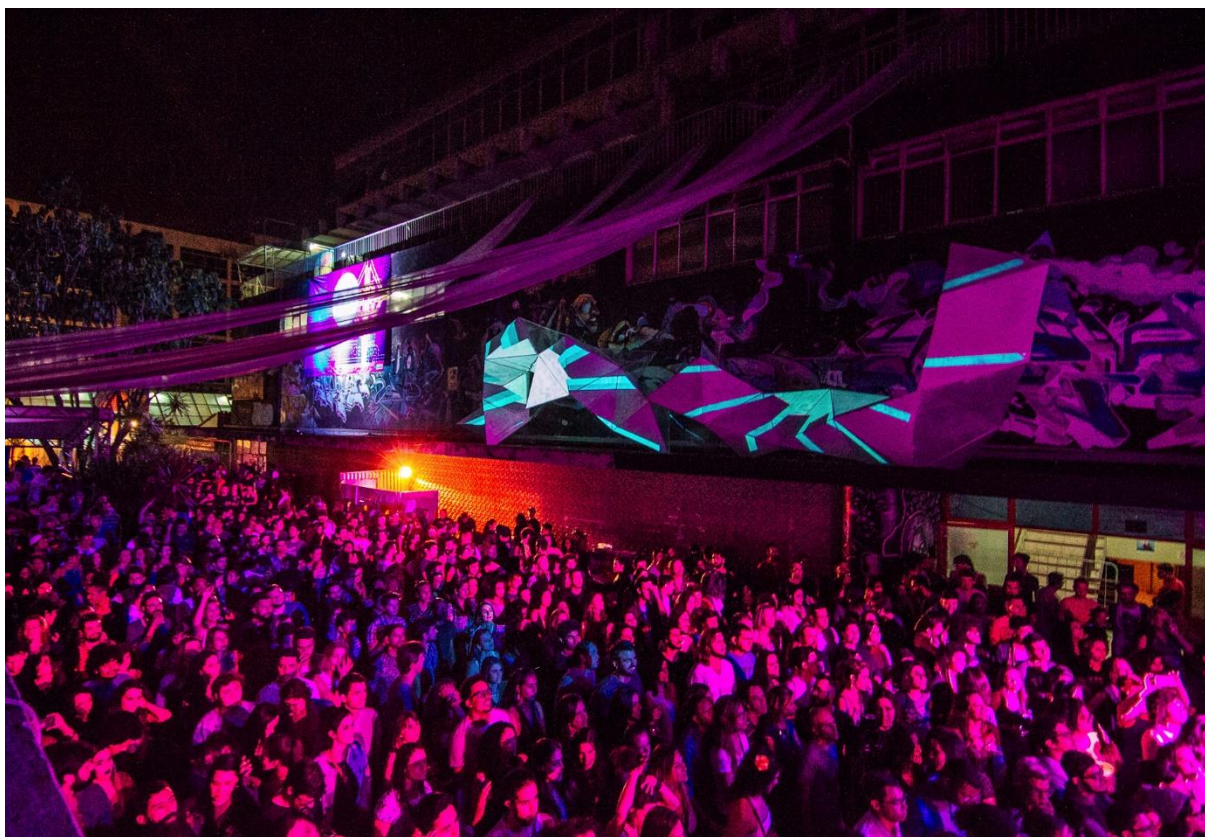
Figura 71 – “O Móvel” com injeção de gelo seco dentro do envelope artesanal de plástico filme e iluminação *LED*.



2016. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

No último dia do evento, quinto dia de montagem, a equipe suspendeu a peça acima da marquise de entrada do Teatro Dulcina de Moraes, onde ficou posicionada para receber o mapeamento de vídeo. Para tanto, as laterais que receberiam iluminação foram pintadas com tinta acrílica branca em spray, deixando-as opacas. A artista multimídia Lina Lopes produziu a projeção mapeada de vídeo (Fig. 72). A envelopagem e a pintura foram previstas desde o início do processo de concepção da estrutura, para que “O Móvel” se tornasse uma tela tridimensional para projeção, o que fez a estrutura ganhar um outro caráter visual e interativo com o público.

Figura 72 – “O Móvel” sobre a marquise de entrada do Teatro Dulcina de Moraes com vídeo projeção mapeada.



2016. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

Nesta primeira oportunidade de montagem de “O Móvel” foi possível aprender com as várias dificuldades tanto do ponto de vista da concepção de sua forma, quanto do ponto de vista de sua execução material, de tal forma, que se sistematizou um processo de montagem, tornando-o, assim, mais eficiente e objetivo, independente da forma que a obra poderia assumir. O processo de parametrização do projeto foi decisivo para tornar a sistematização mais eficiente, ao facilitar a criação de diferentes formas e possibilidades de montagem.

A segunda oportunidade de montagem de “O Móvel”, com basicamente as mesmas propriedades da primeira vez, ou seja, peças para receber projeção em vídeo, ocorreu dentro do Centro Cultural Banco do Brasil – CCBB (Fig. 73), em Brasília – DF, projetado por Oscar Niemeyer, como parte de um outro festival de música e cultura da cidade.

Figura 73 – “O Móvel” suspenso na fachada do Centro Cultural Banco do Brasil – CCBB, em Brasília – DF.

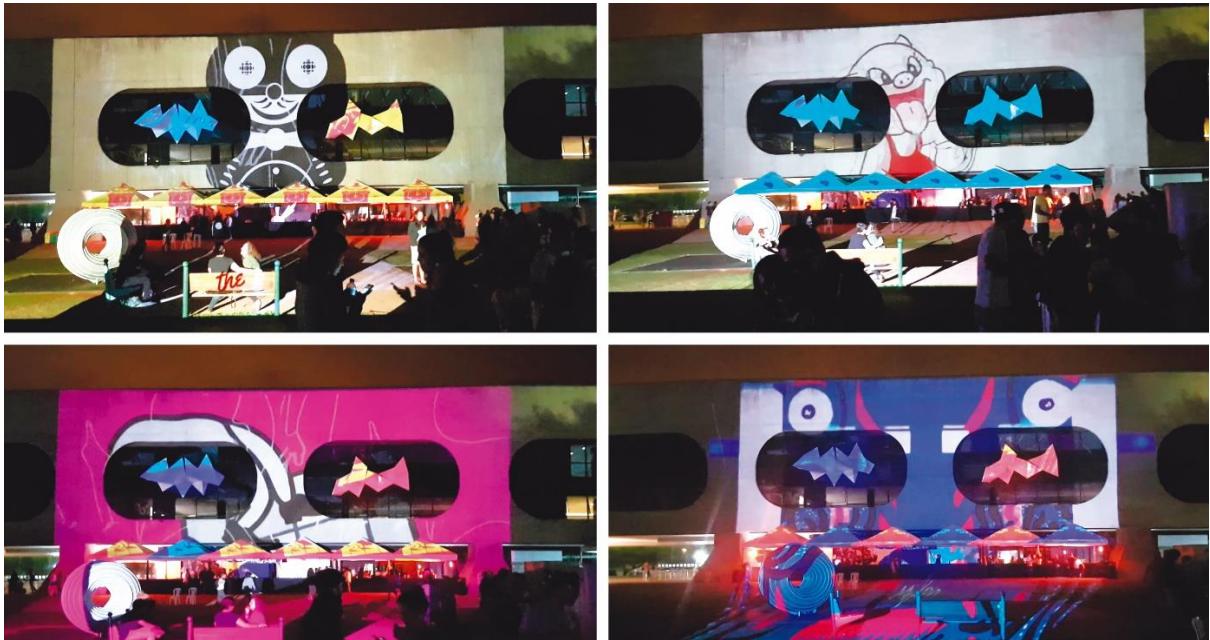


2016. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

O procedimento foi praticamente o mesmo, a partir do modelo algorítmico anterior, com apenas três operações diferentes. Primeiro, o projeto foi planejado para duas peças separadas com tamanhos reduzidos. Segundo, como houve apenas um dia de evento, a peça não se transformou ao longo de sua duração, logo, aplicou-se o envelope de filme plástico apenas nas faces que receberiam projeções de vídeo, produzidas pelo Quase Cinema Lab (Fig. 74). Terceiro, as peças foram projetadas para fixação por cabos de aço que desceram a fachada do prédio do CCBB. Esse último processo não será detalhado aqui, pois constituiu um estágio totalmente artesanal que elevou ainda mais a complexidade da montagem e o tempo gasto durante a execução.

A partir dessa segunda oportunidade de montagem da peça referida, pôde-se confirmar que os encaixes impressos em 3D, que poderiam conectar as barras de alumínio entre si, seriam uma solução inviável, porque o processo de montagem foi diferente da primeira oportunidade. Não apenas por causa das duas partes separadas, mas também porque o sistema de crescimento das pirâmides resultou em diferentes arranjos na geometria geral dos módulos. Assim, os encaixes não seriam eficazes em nenhuma das duas situações.

Figura 74 – “O Móvel” suspenso na fachada do CCBB com vídeo projeção mapeada.



2016. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

De todo o processo de projeto e construção da estrutura “O Móvel”, entendeu-se que a presença de trabalhos artesanais foi uma constante no processo de produção, apesar da tentativa de alcançar a máxima automação. O que se pôde fazer foi racionalizar o trabalho artesanal por meio do projeto paramétrico.

Compreendeu-se, também, a presença da produção mecanizada em partes do processo. Por fim, percebeu-se que a fabricação digital foi utilizada apenas para a peça impressa em 3D que serviu para corrigir os pontos de perfuração das barras de alumínio. Nesse sentido, deve se ressaltar a dificuldade encontrada na aplicação da tecnologia para os processos construtivos, mas, por outro lado, a eficiência no funcionamento do projeto paramétrico tanto para visualização formal da obra, quanto para o seu processo de montagem.

3.1.4 – Segunda estrutura leve: fechamento em papelão para espaço DJ

O segundo trabalho de cenografia funcionou como um fechamento para proteger a tenda dos músicos (Fig. 75), em evento no Parque da Cidade de Brasília – DF. A orientação dada pelos produtores do evento foi criar um ambiente tropical, com um aspecto rústico, que compusesse arranjos florais, para dar maior privacidade ao

espaço ocupado pelos músicos, uma vez que a sua localização mantinha um acesso direto com o público.

Figura 75 – Fechamento em papelão para evento em Brasília – DF.



2017. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

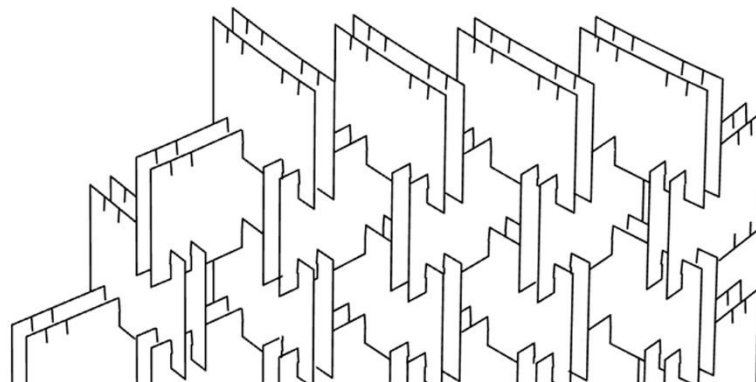
Considerou-se uma série de referências de estruturas de papel (Fig. 76) para este projeto, em especial o trabalho do Kuma Lab, laboratório de pesquisa do arquiteto japonês Kengo Kuma, que, em 2015, realizou *workshop* com estudantes de arquitetura em Brasília – DF com o objetivo de criar soluções para cidades menos favorecidas economicamente que compõem sua área metropolitana. Todo o processo de estudos preliminares dos projetos aqui apresentados referenciou uma série de exemplos que pudessem auxiliar na concepção das estruturas. Estas referências foram incluídas no processo com a intenção de considerar estruturas derivadas de projetos paramétricos, utilização de materiais leves, condição de efemeridade, expressão da forma, e soluções estruturais alcançadas.

Figura 76 – Referências de fechamentos em papel.



2014. Crédito da imagem: Kuma Lab. <https://www.interactiongreen.com/kengo-kuma-lab-materials-paper/>

Figura 77 – Reforço estrutural com placas duplas de papelão.

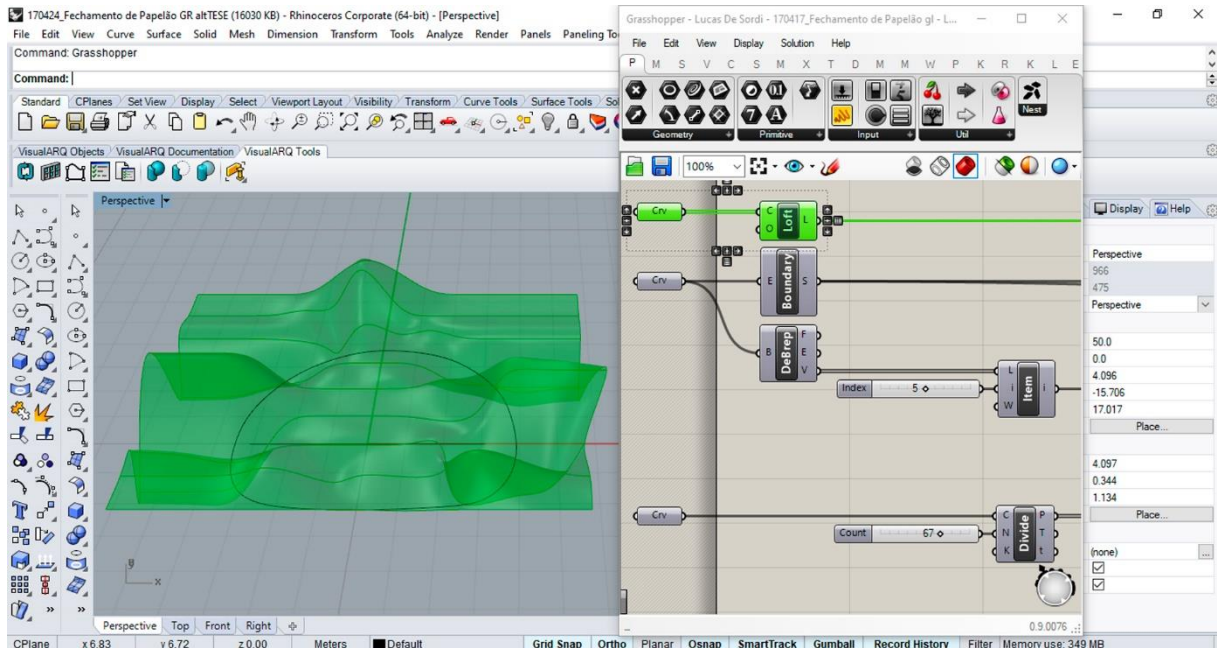


2017. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

A estrutura deveria ser prática, com encaixes básicos e montagem simplificada. Portanto, escolheu-se um único módulo de papelão, com três milímetros de espessura, por apresentar uma solução mais eficiente e econômica, com sistema de encaixe igual para todas as peças. A ideia de reforçar os encaixes com chapas duplas foi considerada em conjunto com o fornecedor do papelão, com a intenção de criar maior resistência para a estrutura (Fig. 77).

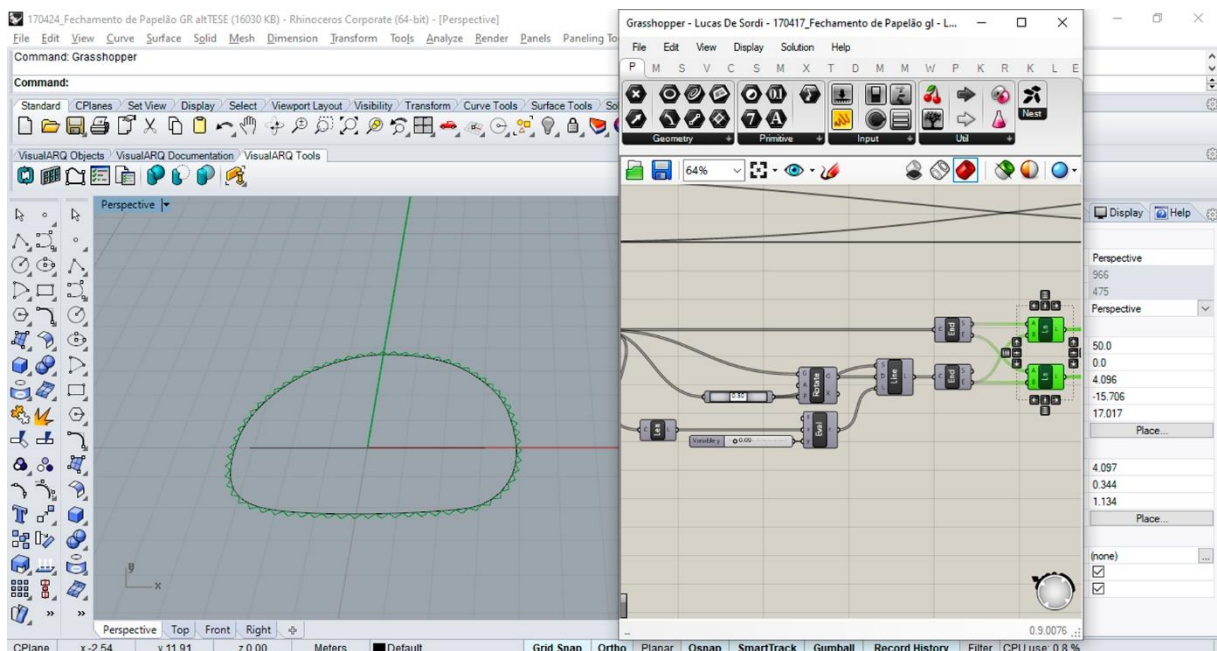
O algoritmo de geração dos fechamentos em papelão, concebido no *Grasshopper*® pela equipe do Coletivo *Voxel Lab*, além de proporcionar, em uma etapa inicial do projeto, uma rápida visualização de possíveis transformações para garantir o melhor efeito e funcionalidade, também possibilitou, nas etapas subsequentes, o detalhamento por meio de um sistema generativo. O modelo algorítmico partiu de duas funções. A primeira função foi criar uma superfície para parametrizar as alturas dos fechamentos, a partir de curvas modeladas ponto a ponto no *Rhinoceros*® (Fig. 78).

Figura 78 – Primeira etapa da definição *Grasshopper*®, parâmetro de altura dos fechamentos.



2017. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

Figura 79 – Distribuição de ângulos para localização dos módulos de papelão.

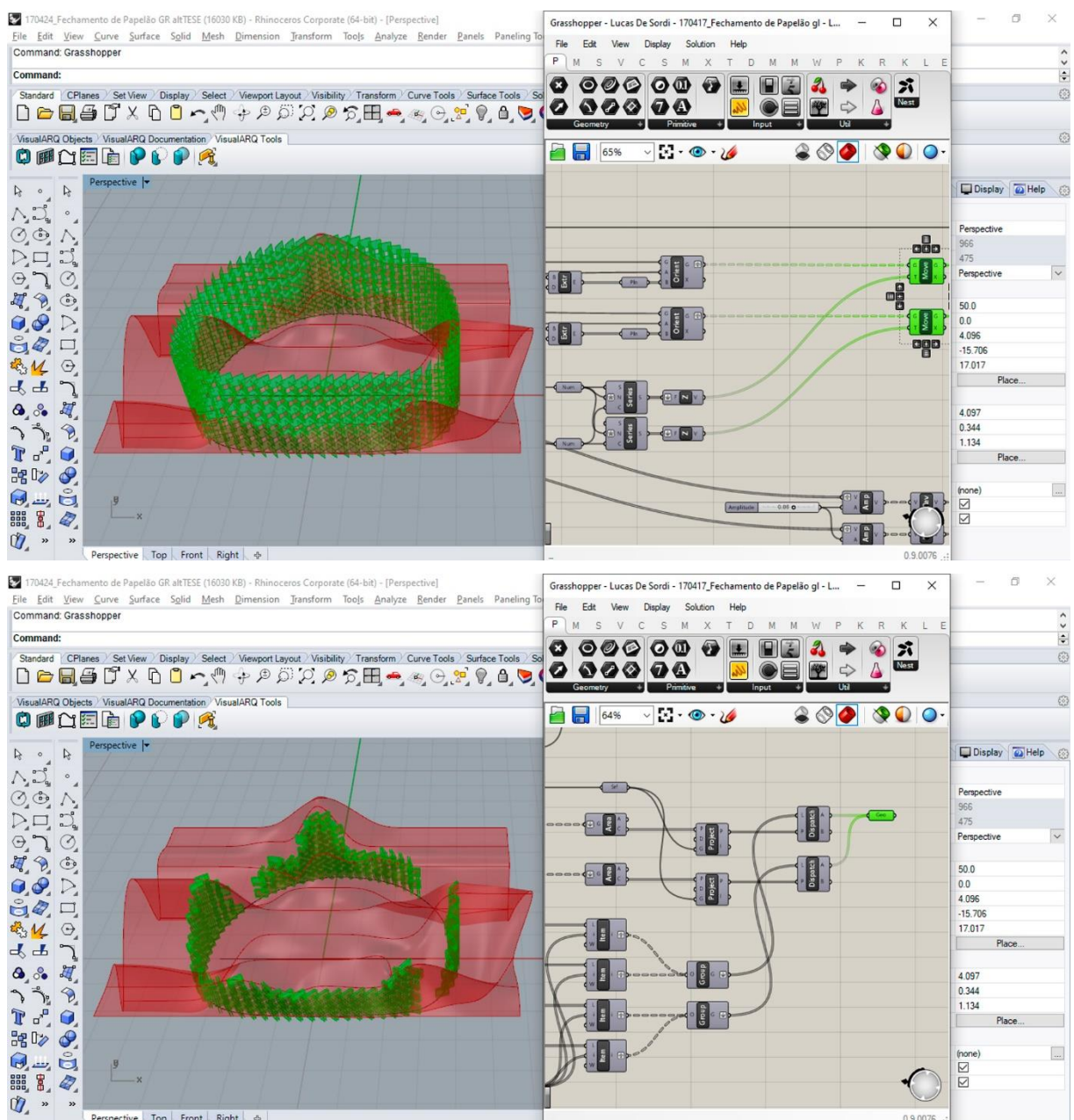


2017. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

A segunda função foi gerar uma distribuição dos módulos ao longo de uma curva, também modelada ponto a ponto no *Rhinoceros*®, de tal forma que os módulos fossem distribuídos tangencialmente em ângulos variáveis e mantendo entre si uma distância viável para que pudessem ser realizadas as interseções entre as chapas duplas (Fig. 79).

A partir dessa distribuição, os módulos foram sobrepostos para criar a altura do fechamento, que foi, por assim dizer, cortada pela superfície modelada na primeira função, restando apenas aqueles módulos cujos pontos de localização tridimensional estavam abaixo da superfície (Fig. 80). O resultado foi o modelo com a forma final dos fechamentos, pela observação na tela do computador. Uma vez que a superfície foi modelada por meio de suas curvas geratrizes, a configuração das alturas dos fechamentos foi automaticamente reajustada. Da mesma forma, poderia se ajustar a curva de distribuição dos módulos e todo o sistema se reajustaria.

Figura 80 – Escolha das alturas do fechamento a partir de superfície modelada ponto a ponto.



2017. Crédito da imagem: Coletivo Voxel Lab.

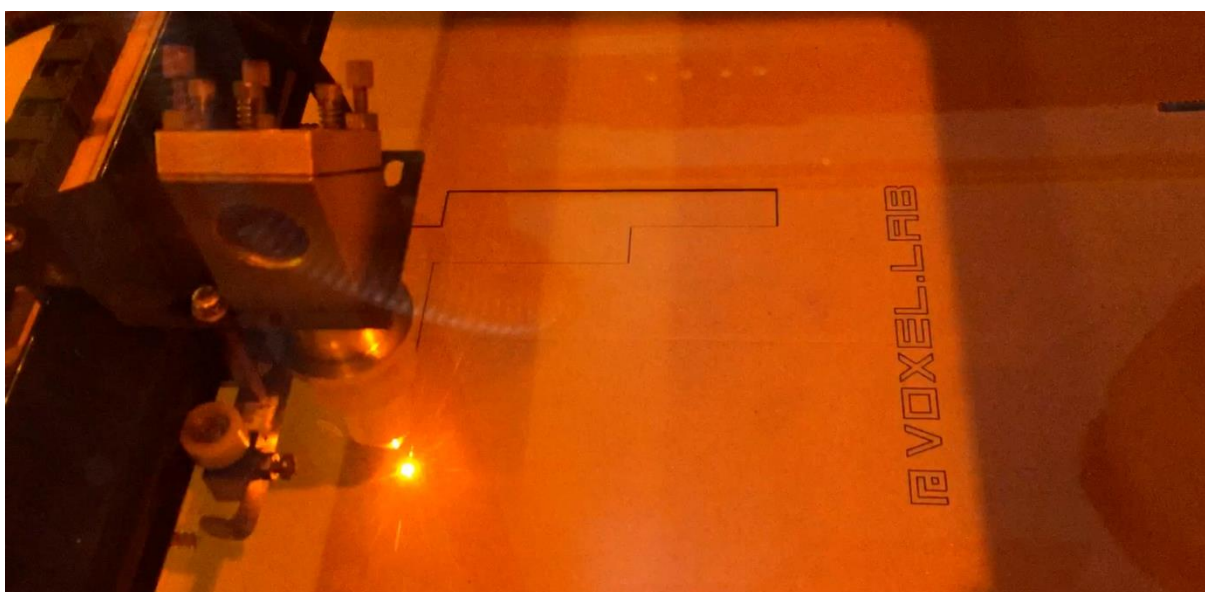
A partir do perfil final do módulo, uma faca de prensa (Fig. 81) cortou em um único dia 800 módulos que foram embalados para remessa ao local de montagem. Posteriormente, uma máquina de corte a laser (Fig. 82) foi utilizada para gravar e cortar a logomarca do Coletivo *Voxel Lab* em algumas das placas, aproximadamente 80 peças.

Figura 81 – Processo artesanal de fabricação dos módulos por faca de prensa.



2017. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

Figura 82 – Corte a laser da logomarca do Coletivo *Voxel Lab*, em uma das placas.

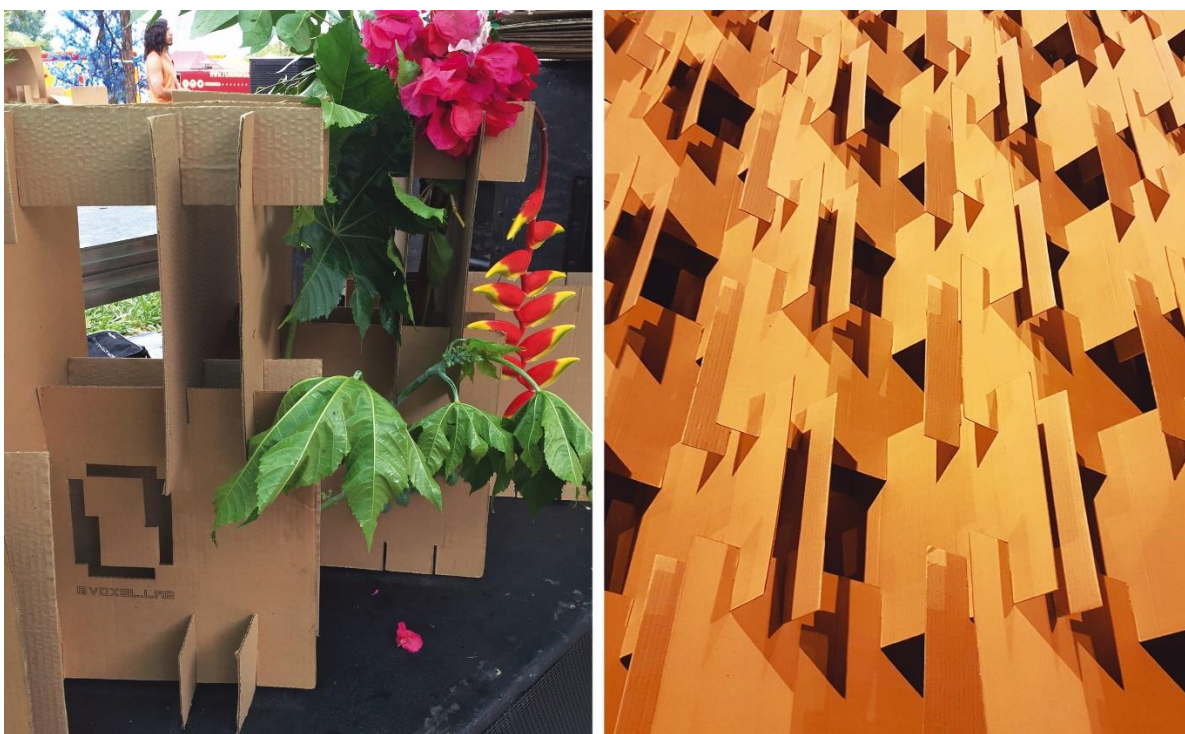


2017. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

Uma vez que as placas foram entregues no local, o processo de montagem foi rápido e bastante flexível. Em menos de duas horas, todas as 800 peças foram montadas para testar o efeito geral do fechamento. O aplicativo *Rhinceros*® para *smartphone* foi usado para conferência da forma, durante a montagem.

A flexibilidade do processo de montagem conduziu a uma diversidade de composição, proporcionando liberdade para as alturas e tamanhos de cada um dos 4 fechamentos, dois mais altos para o fechamento das laterais da tenda, um mais longo para o fechamento da parte posterior e um mais decorativo para o fechamento frontal da mesa do *DJ*. A vegetação aplicada deu o toque de acabamento ao trabalho, trazendo cores e uma aparência simples e atraente, com flores e plantas tropicais (Fig. 83).

Figura 83 – Arranjo floral aplicado ao fechamento e seu respectivo sistema de encaixe entre placas de papelão de três milímetros.



2017. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

A dificuldade deste projeto foi o tempo de projeto e execução em apenas 6 dias. Nesse sentido, o uso de parametrização e fabricação mecanizada e digital foram essenciais para a viabilidade do produto final. A parametrização facilitou o processo de decisão da forma final do fechamento e sem a fabricação mecanizada não haveria possibilidade de produção artesanal, ou seja, o corte manual de 800 peças, o que

afetaria diretamente a qualidade estética do produto. Dessa forma, pôde-se verificar como a aplicação de sistemas computacionais e mecânicos facilita os processos de projeto, detalhamento e execução.

Aprendeu-se com este projeto que, embora fossem usadas máquinas para construir o maior número possível de etapas, ainda não se pôde afirmar uma prática completa de fabricação digital, porque esta tecnologia foi utilizada somente para gravar o logotipo do coletivo em algumas peças de papelão. Este projeto também revelou que se poderia alcançar uma produção digital completa, pelo menos para a etapa de processamento do material, porque o papelão poderia ser cortado a laser por CNC, no entanto, o custo e o cronograma aumentariam consideravelmente.

3.1.5 – Terceira estrutura leve: *parklet* multifuncional

Este terceiro trabalho foi produzido para o evento “Tubo de Ensaios 2017”, intitulado “TubUrbanos – Direito à cidade”, promovido pela Casa de Cultura da América Latina – CAL, sob a direção de Alex Calheiros, em conjunto com o Decanato de Extensão – DEX e o Decanato de Esportes e Arte – DEA, da UnB. O *parklet* configurou um espaço multifuncional que ocupou três vagas do estacionamento público em frente ao Edifício Anápolis, localizado no Setor Comercial do Sul – SCS, em Brasília – DF, onde a CAL está sediada.

A definição de *parklet* é encontrada no Art. 2.º do Decreto n.º 55.045/14, tratando-o como “uma ampliação do passeio público, realizada por meio da implantação de plataforma sobre a área antes ocupada pelo leito carroçável da via pública, equipada com bancos, floreiras, mesas e cadeiras [...], com função de recreação ou de manifestações artísticas”. (SÃO PAULO, 2014, p. 1)

A ideia de criar uma relação entre o prédio da CAL e seu contexto urbano orientou o projeto do *parklet* e, nesse sentido, estabeleceu uma conexão entre a fachada do prédio e o estacionamento localizado à sua frente⁴³ (Fig. 84). A ocupação fez parte de uma ação política da CAL em relação ao direito de uso dos espaços

⁴³ O projeto foi realizado dentro de um programa de residência artística da CAL, pelo Coletivo *Voxel Lab* em parceria com a artista e arquiteta Carla Barreto e foi apresentado em um *workshop* de intervenção urbana dedicada aos artistas que participariam do evento “Tubo de Ensaios 2017”.

públicos e à retirada momentânea de veículos, devolvendo esses espaços à população e criando novos ambientes de convivência.

Figura 84 – *Parklet* multifuncional construído para evento na Casa de Cultura da América Latina, em Brasília – DF.



2017. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

Um empilhamento de trezentos e cinquenta e dois engradados, cada um com 31 centímetros de largura, 41,5 centímetros de comprimento por 36 centímetros de altura, criou a ocupação do *parklet*. A forma do empilhamento referiu-se a um elemento que flui do letreiro de sinalização da CAL e se acumula no chão, gerando um palco para apresentações artísticas. A principal referência a esse efeito de escorrimento foi a escultura em formato de mão, presente no Memorial da América Latina, em São Paulo, de autoria de Oscar Niemeyer (Fig. 85).

O efeito de escorrimento foi gerado por uma definição *Grasshopper*®, a partir da simulação gravitacional de uma malha, utilizando-se o *add-on Kangaroo*®. Antes

de iniciar a modelagem algorítmica, modelou-se no *Rhinceros*®, ponto a ponto, o edifício da CAL, de forma a simular suas propriedades arquitetônicas, principalmente a altura da galeria de entrada e a distribuição de pilares existentes no local. O primeiro passo da definição foi gerar uma matriz de pontos, de forma a localizar as origens das posições dos engradados (Fig. 86).

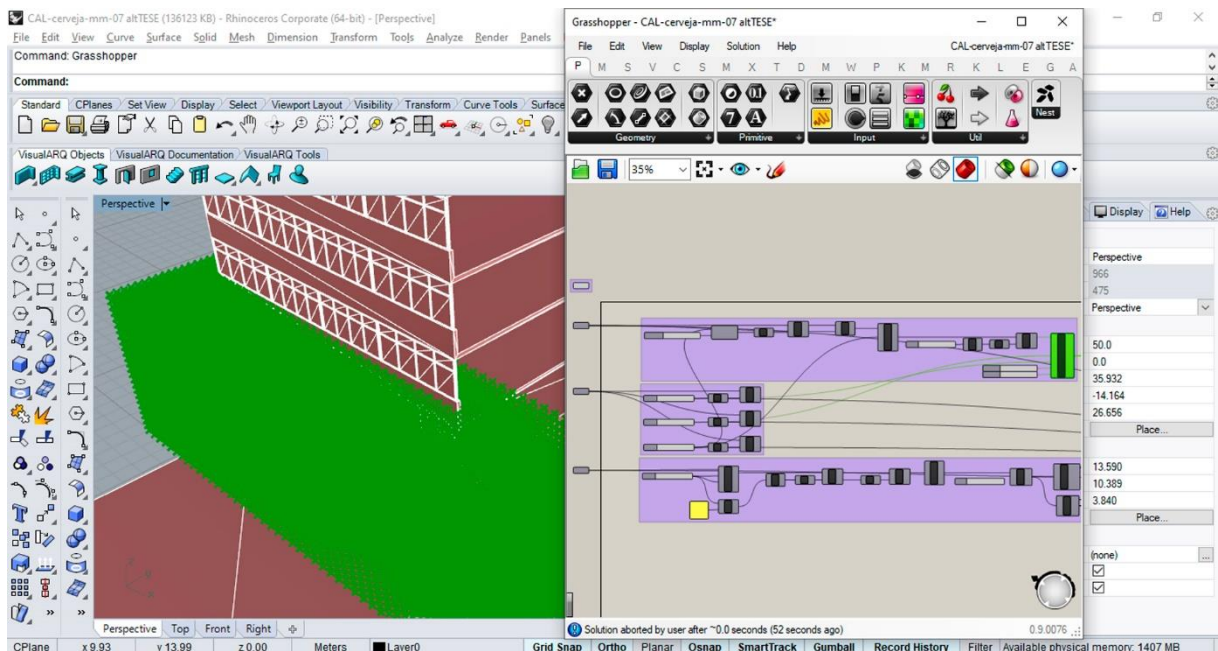
Figura 85 – Escultura do Memorial da América Latina, Oscar Niemeyer, São Paulo.



2016. Crédito da imagem: Monica Evelyn da Silva.

https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Memorial_da_am%C3%A9rica_latina_2_-_S%C3%A3o_Paulo.jpg

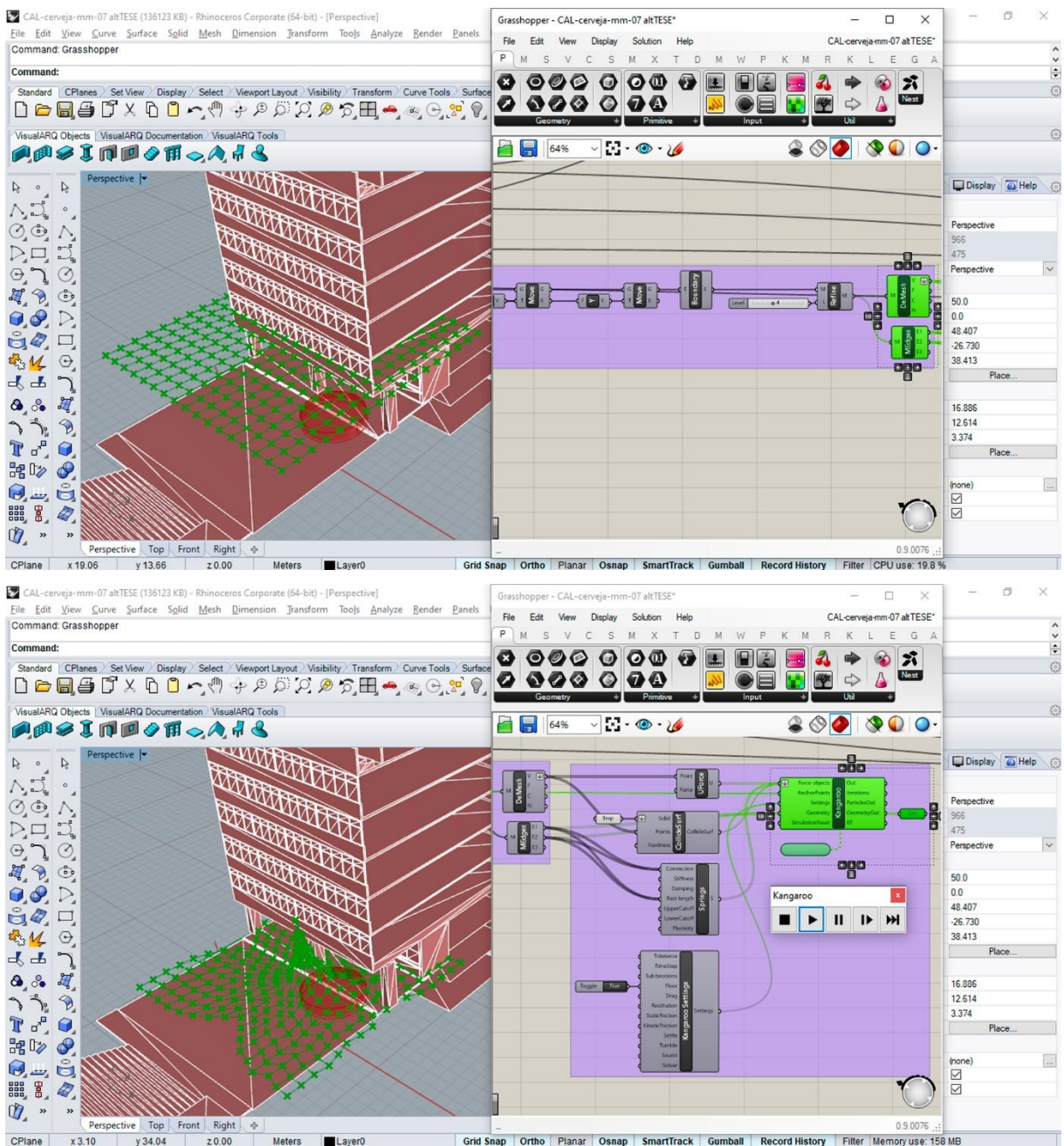
Figura 86 – Nuvem de pontos em matriz a partir das medidas do engradado que seria utilizado no *parklet*.



2017. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

O segundo passo da definição foi criar a malha e fixá-la pelo seu ponto central, em um local específico da fachada do modelo 3D do edifício. Utilizando a simulação gravitacional *Kangaroo*®, criou-se um efeito de queda da malha sobre uma geometria ameboide, previamente modelada ponto a ponto no *Rhinceros*®, elevada cinquenta centímetros do piso, com a área necessária para cumprir a função de palco, aproximadamente quinze metros quadrados (Fig. 87).

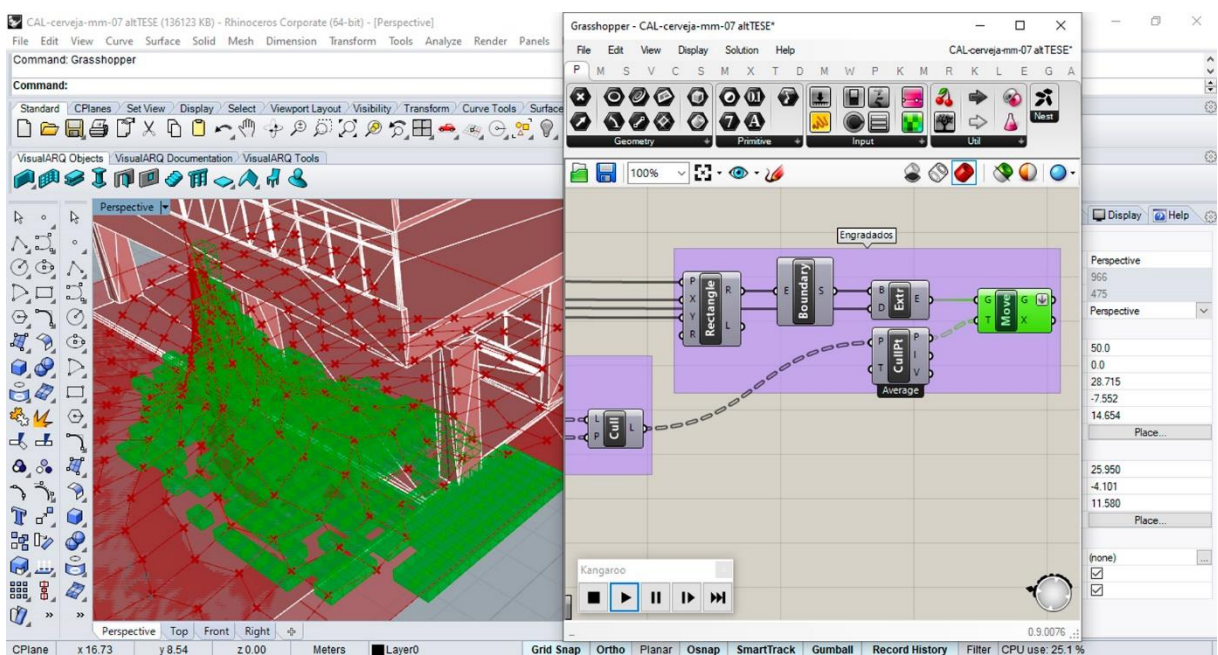
Figura 87 – Simulação gravitacional de uma malha 3D em colisão com objetos previamente modelados ponto a ponto.



2017. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

A partir das linhas da malha resultante, gerou-se uma superfície que estabeleceu um limite para selecionar alguns dos pontos da matriz anteriormente parametrizada. O espaço residual sob a superfície foi então preenchido com caixas, reproduzindo seu formato de maneira voxelizada, como se perdesse a resolução, mas mantendo uma forma geral aproximada (Fig. 88). Portanto, um modelo algorítmico gerou esse processo, alcançando com maior facilidade a forma final, o que seria difícil de ser modelado ponto a ponto em 3D.

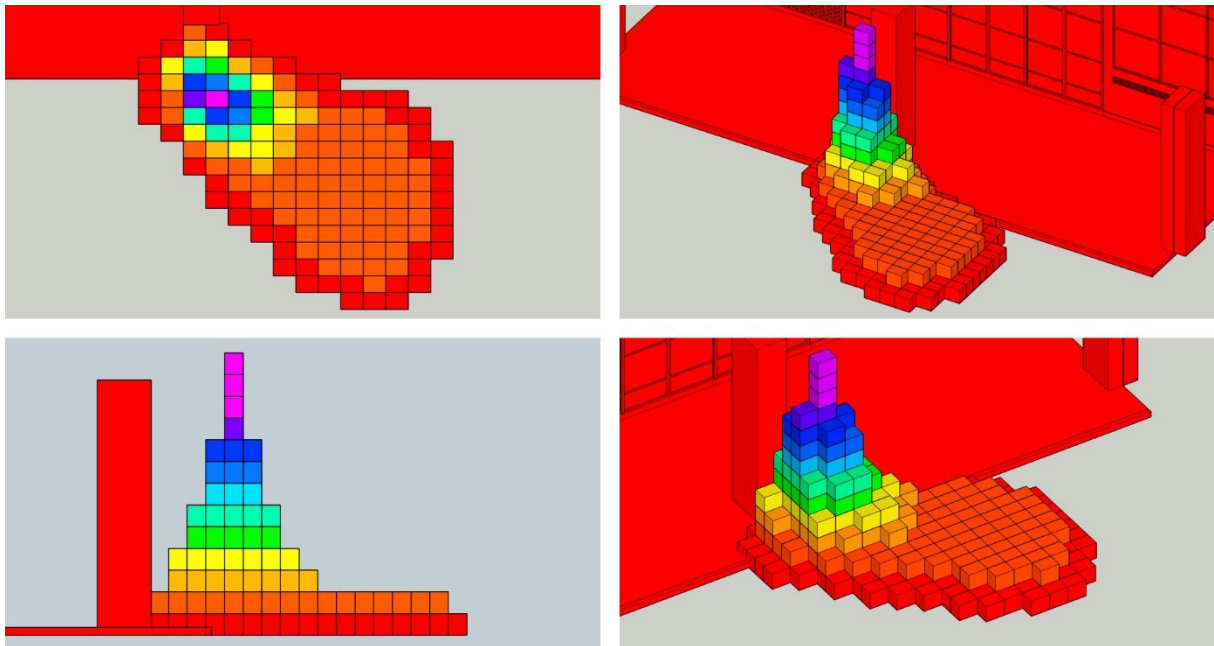
Figura 88 – Preenchimento do espaço residual da superfície com módulos de engradado.



2017. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

Um mapa tridimensional auxiliou o processo de montagem, distinguindo por cor treze camadas de empilhamento, da base mais ampla, com um número maior de engradados, até o topo, com um único (Fig. 89). As imagens do mapa foram geradas e compartilhadas no aplicativo *Rhino*® para *smartphone*, para rápida conferência durante a montagem. Amarrações por meio de fita plástica, com aproximadamente quatro milímetros de largura, interconectaram os engradados. A área mais alta, que criou um mirante, foi reforçada com mais fitas, travando as caixas verticalmente, além do travamento horizontal.

Figura 89 – Mapa de montagem por cores para o processo de empilhamento de engradados.

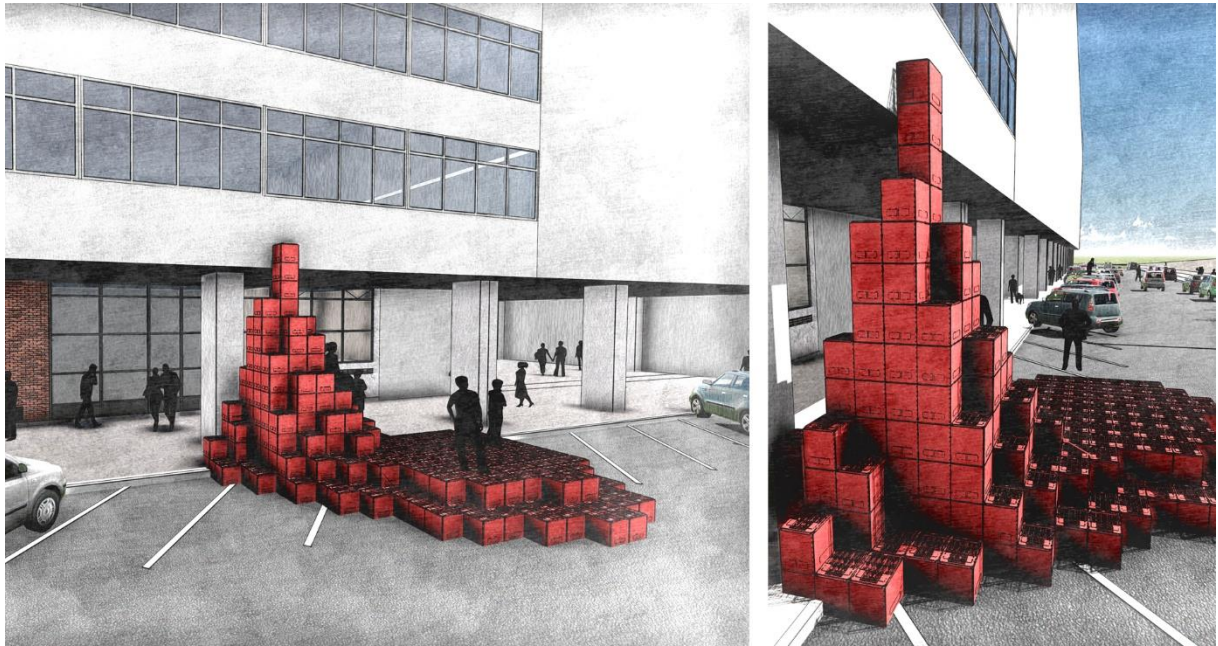


2017. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

Como o material chegou pronto ao local da montagem, não houve processamento para formatá-lo de uma maneira específica. O único procedimento foi o empilhamento peça por peça, realizado artesanalmente e orientado pelo mapa tridimensional. Como o tamanho e a quantidade final de caixas foram conhecidos apenas no dia da entrega, o algoritmo facilitou a adaptação formal até o último momento, e esse foi um aspecto importante, possibilitando verificar como o processo algorítmico adapta rapidamente a geometria a partir dos parâmetros específicos. Além disso, o projeto por meio de simulação computacional facilitou a decisão estética do *parklet*, pois encontrou uma forma específica que representou com maior precisão a intenção original do escorrimento na fachada do edifício. (Fig. 90)

Este último projeto possibilitou testar a versatilidade da modelagem algorítmica para solução de problemas construtivos. Em alguns minutos, logo antes do início da montagem do *parklet*, a última decisão foi tomada para o formato final da estrutura, gerando automaticamente o mapa para orientar o processo de construção. A única produção digital envolvida foi a racionalização do trabalho artesanal.

Figura 90 – Imagens renderizadas do modelo 3D do *parklet* multifuncional.



2017. Crédito da imagem: Coletivo *Voxel Lab*.

3.1.6 – Trabalho artístico e produção digital

Uma importante função que tais eventos vêm assumindo é a promoção de interação social de maneira criativa na cidade de Brasília – DF, o que está se tornando determinante para uma nova atitude urbana, onde a população pode exercer seu direito à cidade. Jeffrey Hou definiu como urbanismo de guerrilha esse tipo de ação, onde os próprios cidadãos encontram “[...] oportunidades nas condições urbanas existentes para mudanças radicais e cotidianas contra as forças dominantes na sociedade.⁴⁴” (HOU, 2010, p. 15, tradução nossa). A decisão de orientar o trabalho dentro de uma estética do artista considera isso, na tentativa de expressar as experiências e sensações que os produtores de tais eventos propõem para a população.

Todos os exemplos aqui analisados serviram para demonstrar as relações entre os usos dos processos computacionais, do projeto à execução, com uma produção artística, orientada para a ocupação de espaços públicos. A principal referência para esse tipo de ocupação é a obra de Nelson Brissac Peixoto (1996, 2012), que é considerada aqui como a principal teoria da arte que orientou o projeto

⁴⁴ Original: “[...] opportunities in the existing urban conditions for radical and everyday changes against the dominant forces in the society.” (HOU, 2010, p. 15).

arquitetônico das estruturas leves aqui apresentadas. Em primeiro lugar, no que diz respeito à questão da fenomenologia, da conexão entre o indivíduo e os espaços ao seu redor; e a compreensão do *flanéur*, como ator que vivencia a cidade. Em segundo, em relação à abordagem interdisciplinar proposta pelo programa Arte Cidade, onde o trabalho arquitetônico se misturou ao trabalho artístico, para criar espaços que possam requalificar grandes áreas urbanas.

A exploração de processos construtivos alternativos, em busca de tipos de espaço e moradia não estandardizado, como tema de pesquisa acadêmica, não é um percurso novo no Brasil. O núcleo de estudos NOMADS da Universidade de São Paulo – USP é uma referência sobre soluções habitacionais experimentais. Marcelo Tramontano (2000), um dos pesquisadores principais do núcleo, propõe a utilização de técnicas construtivas diferentes dos sistemas comuns de construção civil e, desta forma, revela a importância de pensar para além do escopo de produção estandardizado, ao considerar o componente econômico indispensável nos processos arquitetônicos.

Uma das consequências disso é o estudo da flexibilidade que sistemas alternativos de construção podem proporcionar, orientando soluções viáveis para diversas situações de ocupação de espaços públicos ou privados. O próprio NOMADS investiga esses sistemas do ponto de vista do projeto paramétrico e da fabricação digital. Tramontano (2015) apresenta um método de ensino que considera tal perspectiva, ao trabalhar a construção de edificações com geometrias complexas por meio da fabricação controlada por computador.

O estudo sobre alternativas de configuração espacial não se limita ao espaço arquitetônico, alcança também o campo da arte, pois grande parte da produção artística contemporânea explora precisamente a experiência sensorial dos participantes e as relações entre corpo e espaço. Rosalind Krauss (1984) definiu a escultura em um campo ampliado, entrelaçando-a com paisagem e arquitetura, em busca de uma conceituação que pudesse incluir campos artísticos emergentes em sua época, como *land art*, instalação etc.

A necessidade de uma teoria da arte foi indispensável aqui, pois, para manter a qualidade da produção, trabalhando no campo artístico, é preciso mais do que técnica ou aplicação tecnológica, mas consciência e operação artísticas. Trabalhar com arte contemporânea requer mais do que inovação tecnológica, requer exploração

conceitual, sentimentos e sensações, poesia, imagem. Sobre o assunto, Benjamin (2012) apresenta uma teoria válida no campo da filosofia da arte, quase um alerta, sobre o uso do aparato tecnológico para a produção artística.

Este experimento explora o espaço produzido para a arte através de experiências sensoriais por meio da materialização de estruturas leves, caracterizadas por processos rápidos de montagem e desmontagem. Os casos apresentados exemplificam suas técnicas de produção, demonstrando a presença de processos artesanais de fabricação e montagem a partir da busca por processos automatizados.

3.1.7 – Considerações sobre a produção digital qualificada pelo contexto específico

Considera-se que o uso de técnicas computacionais, seja o projeto paramétrico ou a fabricação digital, é muito útil em situações onde os recursos são geralmente escassos e os prazos são curtos. Tais técnicas permitem agilidade, garantindo a qualidade do trabalho. No entanto, ainda existe uma lacuna entre o que é projetado parametricamente e o que é possível ser construído com o auxílio do computador, no contexto brasileiro. Conforme o argumento compreendido nos procedimentos metodológicos, de que há uma independência entre os processos de fabricação digital e de construção artesanal, o projeto paramétrico é eficiente para ambos os casos, o que informa a possibilidade de desenvolvimento da técnica mesmo em contextos com menor acesso às tecnologias avançadas.

Uma característica foi comum a todos os projetos, o material escolhido para a estrutura ditou todas as decisões construtivas e os algoritmos as seguiam, como se fossem formulados para expressar as formas de processamento dos próprios materiais. Circunstancialmente, a falta de recursos restringiu a produção em si, mas houve respostas positivas e mesmo decisões simples na direção da automação tiveram que ser adaptadas ao aspecto econômico dos projetos.

Outra característica semelhante foi a modularidade de cada projeto, ou a voxelização dos materiais. Os projetos foram selecionados propositadamente para expressar essa marca do coletivo de trabalhar com *voxels*, ou *pixels* 3D, para a configuração das estruturas.

O primeiro projeto foi complexo, envolveu muitas etapas de produção, o que dificultou a introdução de tecnologias inovadoras, principalmente porque se trabalhou com orçamentos baixos, compreendendo-se que para cada decisão de projeto há um problema econômico associado. Se "O Móvel" fosse uma peça escultural singular, montada de uma maneira específica, os nós impressos em 3D funcionariam com eficiência e, talvez, poderia se desenvolver outro sistema de envelopagem, por exemplo, cortado por métodos CNC, ao invés do envelope artesanal feito em plástico filme. Porém, para todas essas decisões, o tempo de produção, o aspecto financeiro e até o peso final da estrutura aumentariam proporcionalmente.

O segundo e o terceiro projetos foram mais simples em termos de concepção das estruturas, uma vez que direcionaram, desde o princípio, um material específico. A tentativa foi simplificar a produção, reduzindo as etapas de processamento do material, até que no último projeto não houve processamento algum, apenas o projeto e a montagem direta.

O que pôde ser verificado, do ponto de vista da fabricação das três estruturas leves, foram processos parametrizados racionalizando a presença marcante da produção artesanal. Mesmo que a parametrização seja ideal para o controle, por exemplo, de um braço industrial robótico, simplesmente não há acesso a essas máquinas. No contexto dado, a parametrização entendida, nesse sentido, como a maneira de controlar os métodos operacionais de tais tecnologias. Porém, atualmente, não há aplicações viáveis de construção em Brasília – DF.

A *autopoiesis* da arquitetura proposta por Schumacher (2011) ainda é inatingível em certos contextos socioeconômicos, havendo a necessidade de se manter presente a lógica da produção artesanal em todas as etapas do processo de construção. Embora os exemplos apresentados aqui sejam extremamente simples e pequenos em relação ao trabalho dos principais arquitetos que utilizaram, ou utilizam, a fabricação digital, planejou se alcançar a máxima automação em todas as suas etapas de produção. No entanto, o que prevaleceu foi um tipo de construção rudimentar racionalizada pelo projeto paramétrico.

Com relação à questão da produção artística, deve se destacar a necessidade de preencher certas lacunas deixadas pela produção tecnológica por uma teoria de apoio que permita um vínculo produtivo menos limitado por técnicas ou processos produtivos e que mantenha maior relação com o poético, com a imaginação. Richard

Shusterman (2003) construiu uma relação entre filosofia e arte, argumentando que a filosofia por si só é insuficiente e incapaz de trazer a arte para uma integração mais próxima com a vida, mas que pode fornecer inspirações e argumentos fundamentais para a transformação da arte. Concorde-se com o autor quando propõe o raciocínio filosófico como instrumento de crítica do que é realmente produzido, ao se considerar a produção para além de seus resultados técnicos, operacionais e produtivos. Sem esse tipo de pensamento, os produtos fabricados tecnologicamente não têm sentido, principalmente quando se pensa em uma obra de arte.

Este experimento não pretendeu aprofundar um estudo sobre estética e sua relação com a tecnologia, mas evidenciou a necessidade de estabelecer um pensamento aplicável aos campos produtivos da arquitetura e do design, quando o objetivo final é o trabalho artístico. O principal objetivo aqui foi afirmar uma prática arquitetônica sustentável por meio de uma produção alternativa, que mesclasse prática artística e produção digital, capaz de suprir boa qualidade ao produto acabado.

Os experimentos, no campo das estruturas leves, comprovaram as possibilidades e os limites do uso de diversos materiais, em geral com uso limitado nos espaços da vida cotidiana. Por vezes, a produção em massa oculta processos que podem ser tão eficientes quanto os estandardizados e mais economicamente e socialmente interessantes. A produção não estandardizada torna possível obter experiências espaciais específicas que podem ser tão atraentes e duráveis quanto as peças de design disponíveis comercialmente.

As técnicas computacionais operacionalizaram as experiências mencionadas considerando as limitações locais no contexto produtivo. Portanto, uma prática projetiva foi orientada para permitir a execução de procedimentos complexos que, de fato, constituíram uma série de outras necessidades técnicas além daquelas que os materiais mais comuns exigem. Aqui é estabelecida a crítica principal, caracterizando as limitações da produção digital e percebendo a real dimensão do uso dos processos computacionais em uma escala de produção bastante artesanal. Considera-se que o trabalho artesanal é uma etapa imprescindível para a compreensão do processo construtivo e é especificamente importante para a perspectiva e realidade brasileira.

CAPÍTULO 4

4.1 – Estágio de doutorado no *Digital Fabrication Laboratory* – DFL da Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto – FAUP

A partir dos estudos realizados sobre fabricação robótica, procurou-se incorporar o seu uso ao roteiro de produção digital. Os dois experimentos descritos anteriormente, tanto da Catedral de Palmas – TO quanto das estruturas leves, apontaram limitações sobre a automação de um maior número de etapas dos processos de projeto arquitetônico e construção. Portanto, considerou-se o uso da fabricação robótica como uma potencial solução devido à sua flexibilidade de aplicação, tendo em vista que, uma vez implantado um sistema construtivo robotizado, poderia se racionalizar por braço robótico algumas daquelas operações artesanais, descritas nos experimentos apresentados.

Em janeiro de 2019, o *Digital Fabrication Laboratory* – DFL, da Faculdade de Arquitetura de Universidade do Porto – FAUP, aceitou um pedido de estágio de doutorado⁴⁵ para a investigação sobre uma possível solução para minimização, ou racionalização, do trabalho artesanal. Durante o período do estágio, foi realizada, com recursos próprios, uma rápida e intensa investigação no laboratório de pesquisas português, que conta com um braço robótico *KUKA KR120 HA R2700*. Além da pesquisa no DFL, foram realizadas duas entrevistas com professores que se disponibilizaram a compartilhar suas experiências. A primeira com a Professora Doutora Alexandra Paio, diretora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo do ISCTE-IUL – Instituto Universitário de Lisboa. A segunda com o Professor Doutor Paulo Eduardo Fonseca de Campos, criador do laboratório de fabricação digital DIGI-Fab da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – FAUUSP e, então, professor convidado da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Coimbra.

Conforme José Pedro Sousa (2015), o DFL estava anteriormente localizado no centro da cidade do Porto, Portugal, mas atualmente está localizado dentro de uma grande fornecedora europeia de *Medium-Density Fiberboard* – MDF e tem a possibilidade de trabalhar diretamente com a indústria, introduzindo inovação em seus

⁴⁵ Durante o ano de 2018 quatro tentativas frustradas de patrocínio para pesquisa em instituições estrangeiras atrasaram o nosso cronograma de trabalho como um todo.

processos. Nesse sentido, houve uma oportunidade de entrar em contato com a tecnologia robótica para o corte desse material derivado da madeira.

4.1.1 – Estudos de produção digital para processamento de *MDF*

A primeira iniciativa da pesquisa foi a apresentação do plano de trabalhos ao Professor Doutor José Pedro Sousa, diretor do *DFL*, uma conversa inicial que se constituiu em uma primeira orientação. Nesta ocasião, apresentou-se uma proposta de pesquisa dentro do campo da aplicação da robótica para a produção de habitação de interesse social. A intenção era verificar a viabilidade do uso de tecnologias avançadas para construções de baixo custo.

Tendo em vista essa proposta de pesquisa, o professor referido acima levantou a dúvida sobre a maneira como tal aplicação poderia ser viabilizada e percebeu uma lacuna frente à pesquisa na área da robótica aplicada à construção civil. De acordo com a revisão de literatura sobre aplicação da robótica em arquitetura, apresentada no primeiro capítulo, são muitas as experimentações com o braço robótico para construções com formas geométricas complexas, mas poucas consideram espaços habitáveis, construídos por métodos mais simples.

A partir daí, durante três semanas, realizou-se um trabalho experimental ancorado em um projeto, já em andamento, de um recinto para a oficina do *DFL*, medindo vinte metros de comprimento, cinco metros de largura e cinco metros de altura. A equipe do laboratório desenvolveu o projeto de um fechamento para o espaço que ocupa dentro do galpão industrial, com o objetivo de experimentar diferentes produtos do catálogo da fornecedora.

Figura 91 – *ICD/ITKE Research Pavilion* 2010, Universidade de Stuttgart.



2011. Crédito da imagem: Achim Menges.

Uma referência sugerida foi o *ICD/ITKE Research Pavilion* 2010 da Universidade de Stuttgart (Menges, 2011) (Fig. 91), que investigou o uso de placas de

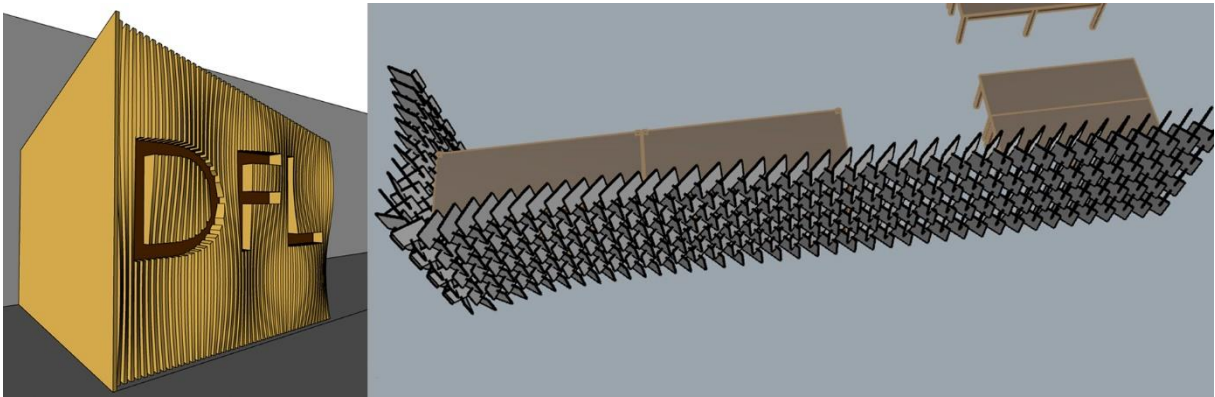
madeira com um sistema de travamento entre as próprias placas, para construir uma concha porosa. A diferença na abordagem do *DFL* foi o pragmatismo, orientando o projeto de um sistema reproduzível que, eventualmente, pudesse se tornar um produto da empresa.

O objetivo principal foi criar um fechamento permeável com placas de *MDF* laminadas, usando um sistema de travamento entre as placas, e uma estrutura de madeira para enquadrar os elementos de fechamento. A partir do projeto, realizou-se uma avaliação qualitativa com a intenção de verificar como a utilização do projeto paramétrico e da fabricação robótica resolveu, ou poderia resolver, diferentes demandas. Foram analisados os processos de concepção e detalhamento do projeto, e, também, os processos de fabricação digital envolvidos na produção de dois protótipos. A equipe trabalhou com os softwares *Rhinoceros*® e *Grasshopper*® e utilizou técnicas diferentes para produção dos modelos palpáveis.

Dois investigadores arquitetos, sob a supervisão do professor orientador, iniciaram o processo de projeto por meio de uma investigação livre, cada pessoa em uma direção diferente. O primeiro pesquisador iniciou o estudo de uma superfície estriada, modelada no *Rhinoceros*®, imaginando uma sequência de placas cortadas em duas dimensões, mas que em conjunto criariam um volume ondulado, com a aplicação da identidade visual do laboratório. O segundo investigador⁴⁶ iniciou um estudo, modelado algoritmicamente no *Grasshopper*®, de placas travadas entre si em um esquema de acoplamento simples, criando um fechamento autoportante de fácil montagem. Ambos os estudos vislumbravam um esquema de corte usando o braço robótico para aquelas placas que conformariam uma parte curva do fechamento (Fig. 92).

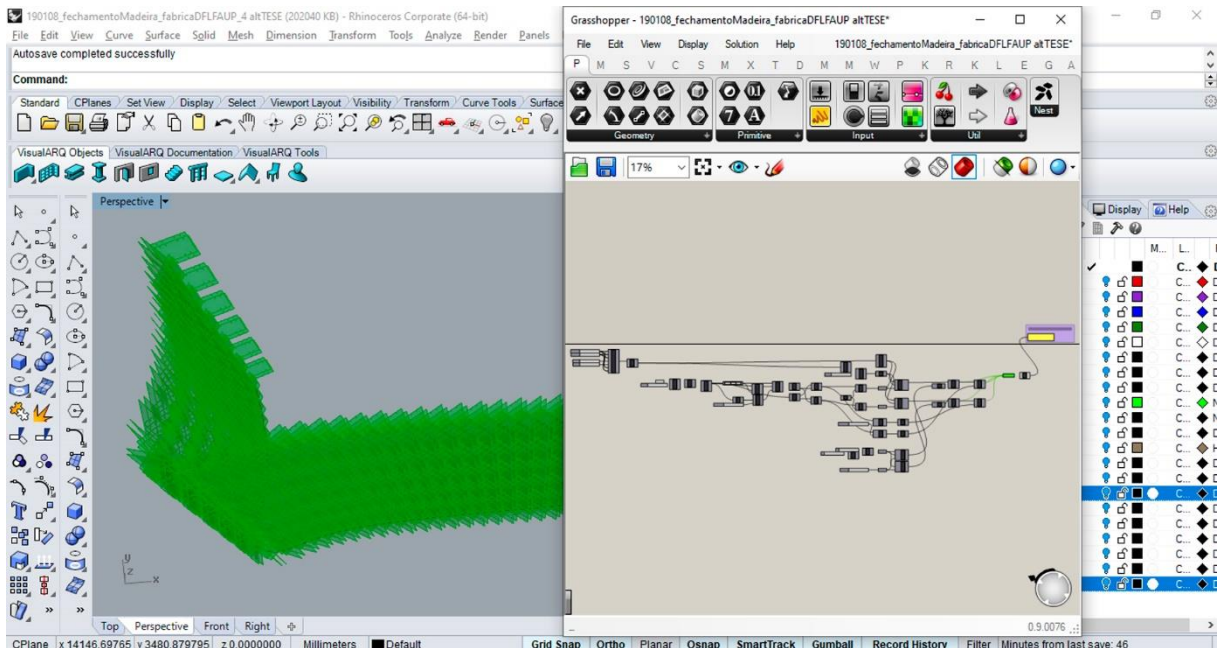
⁴⁶ Para efeitos desta descrição, não se identificou os nomes dos investigadores. No entanto, a equipe do laboratório, dedicada ao projeto em questão, era formada por apenas um investigador da própria instituição e com a minha colaboração a equipe se consolidou com dois investigadores, até o momento da entrada de um terceiro investigador também da mesma instituição.

Figura 92 – Estudos iniciais para fechamento do espaço de trabalho do *DFL FAUP*.



2019. Crédito da imagem: *DFL FAUP* e elaborado pelo autor, respectivamente.

Figura 93 – Atualização da definição *Grasshopper®* do fechamento em papelão para o fechamento em *MDF*.

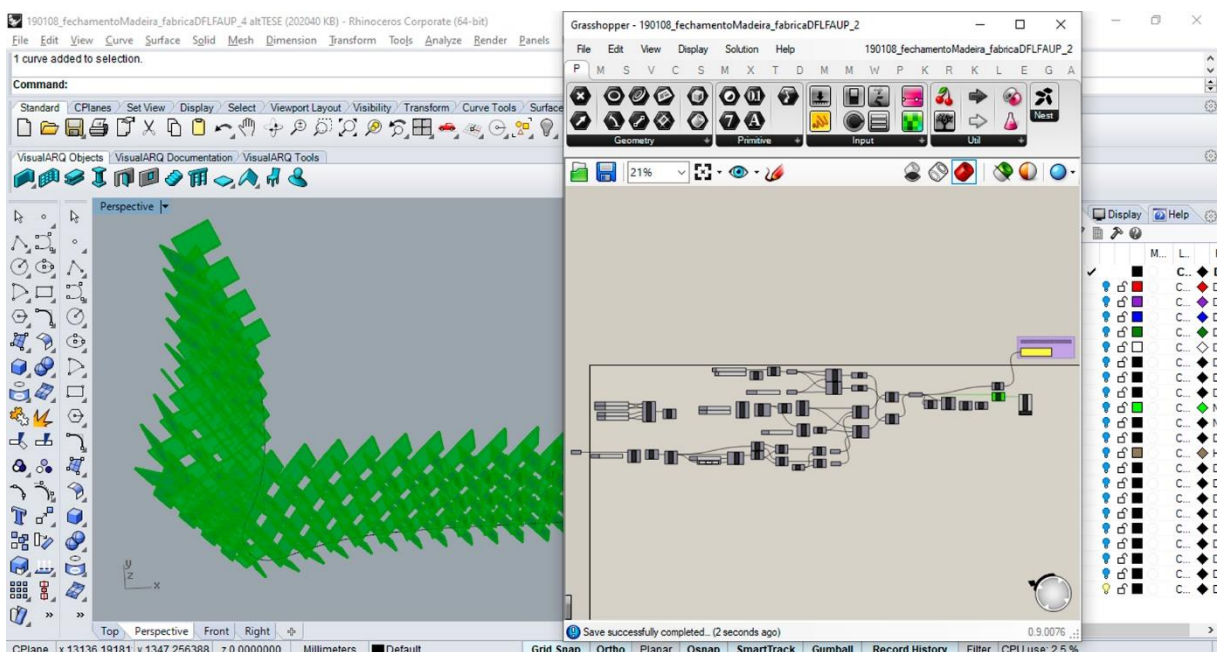


2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

A base da definição *Grasshopper®* mencionada foi o sistema generativo desenvolvido para o projeto do fechamento em papelão descrito no capítulo anterior (Fig. 93). Enfatiza-se aqui a importância de manter uma biblioteca de definições, algoritmos, modelos algorítmicos, pois é desse acúmulo de dados que o projeto paramétrico pode se beneficiar, em um processo evolutivo. A partir dessa base, adaptou-se a definição para atender ao material em placas de *MDF*, com quatro centímetros de espessura, que se pretendia utilizar.

Nesse sentido, pelo fato do material ser mais espesso e resistente, em comparação ao papelão, anteriormente utilizado, não houve a necessidade de reforço com placas duplas, reduzindo a quantidade de encaixes entre as peças e modificando, conseqüentemente, o desenho do perfil do módulo que seria fabricado para os trechos ortogonais do fechamento. Para aqueles trechos curvos, imaginou-se um esquema de fresagem pelo braço robótico, uma vez que a variação dos ângulos dos encaixes dificilmente seria realizada por uma máquina CNC de três eixos de movimentação. (Fig. 94)

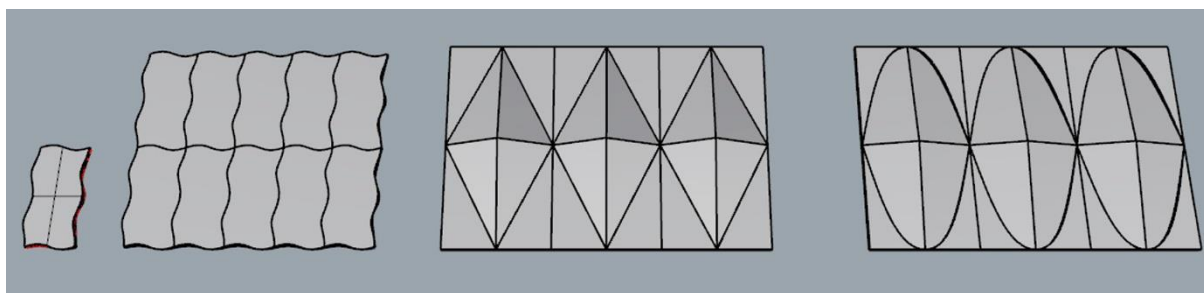
Figura 94 – Resumo da definição *Grasshopper*® para fechamento em *MDF*.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Paralelamente à investigação livre sobre o fechamento do espaço de trabalho do *DFL FAUP*, ambos os pesquisadores modelaram ponto a ponto no *Rhino*® um esquema de painéis a partir das mesmas placas de *MDF* de quatro centímetros de espessura, que medem um metro de comprimento por cinquenta centímetros de largura. A ideia era projetar um fechamento com sistema de travamento simples, que dependeria de uma estrutura de suporte. Essa investigação conduziu à busca de uma superfície volumétrica a partir das placas planas. (Fig. 95)

Figura 95 – Estudos de painéis com placas de *MDF*.

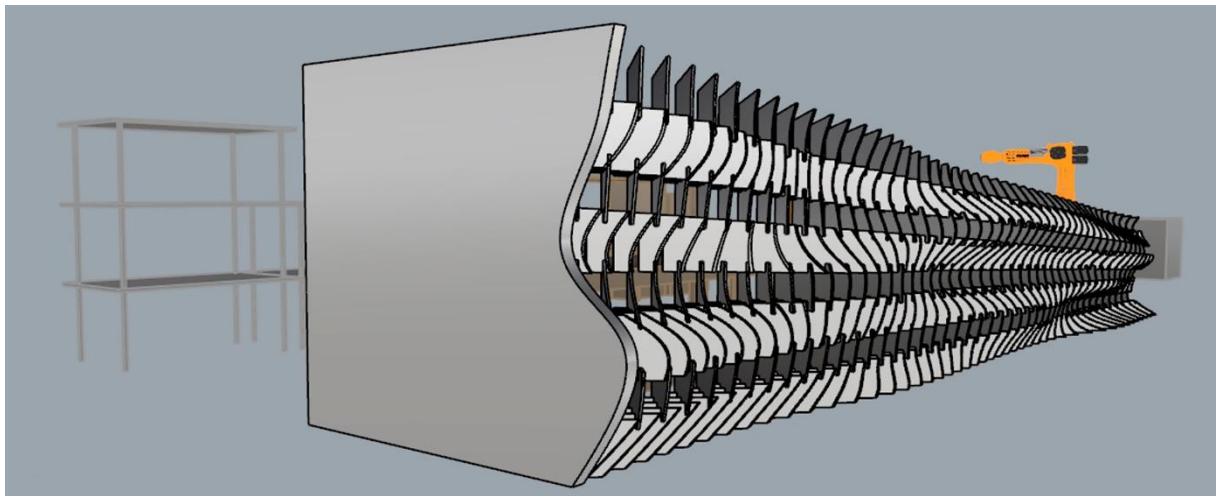


2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Após a primeira fase de investigação livre, o professor orientador analisou as soluções iniciais, a fim de otimizar a continuação das atividades. A investigação formal do segundo pesquisador foi valorizada e houve a sugestão de continuá-la em uma exploração mais estética, modificando parâmetros que pudessem reforçar a percepção do fechamento, introduzindo maior complexidade aos formatos das placas. Em relação ao estudo paralelo do esquema de painéis, a demanda foi por soluções mais simples que minimizassem o uso de encaixes complexos. Mesmo com a possibilidade de usar o braço robótico, a orientação exigia soluções com maior praticidade de fabricação e montagem mais rápida.

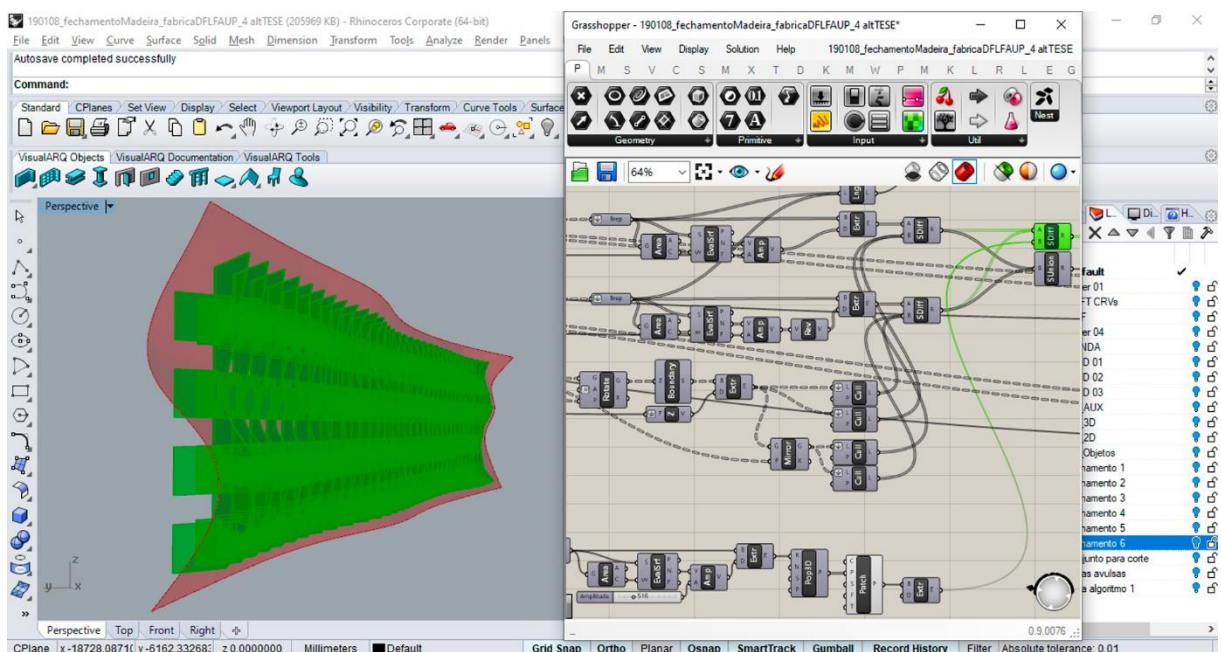
Com base nas sugestões do orientador, o segundo pesquisador continuou a definição *Grasshopper*®, agregando maior complexidade visual ao sistema de fechamento autoportante (Fig. 96). Logo, uma nova etapa de adaptações foi incluída ao sistema generativo original do fechamento em papelão. Primeiramente, aumentou-se a largura final do fechamento, conseqüentemente o número de conexões entre as próprias peças e, posteriormente, atribuiu-se maior variabilidade aos formatos, introduzindo deformações horizontais e verticais ao conjunto, criando, assim, placas com altura e comprimento variados. Essas deformações foram feitas por uma superfície de corte de uma das extremidades das placas, configurando uma superfície curvilínea, no conjunto das diversas placas montadas entre si (Fig. 97). Tal superfície foi modelada algorítmicamente na definição, possibilitando visualização de uma grande quantidade de variações do resultado final do fechamento, sem necessidade de modelagem ponto a ponto.

Figura 96 – Continuação da modelagem algorítmica para projeto de fechamento em placas de *MDF*.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

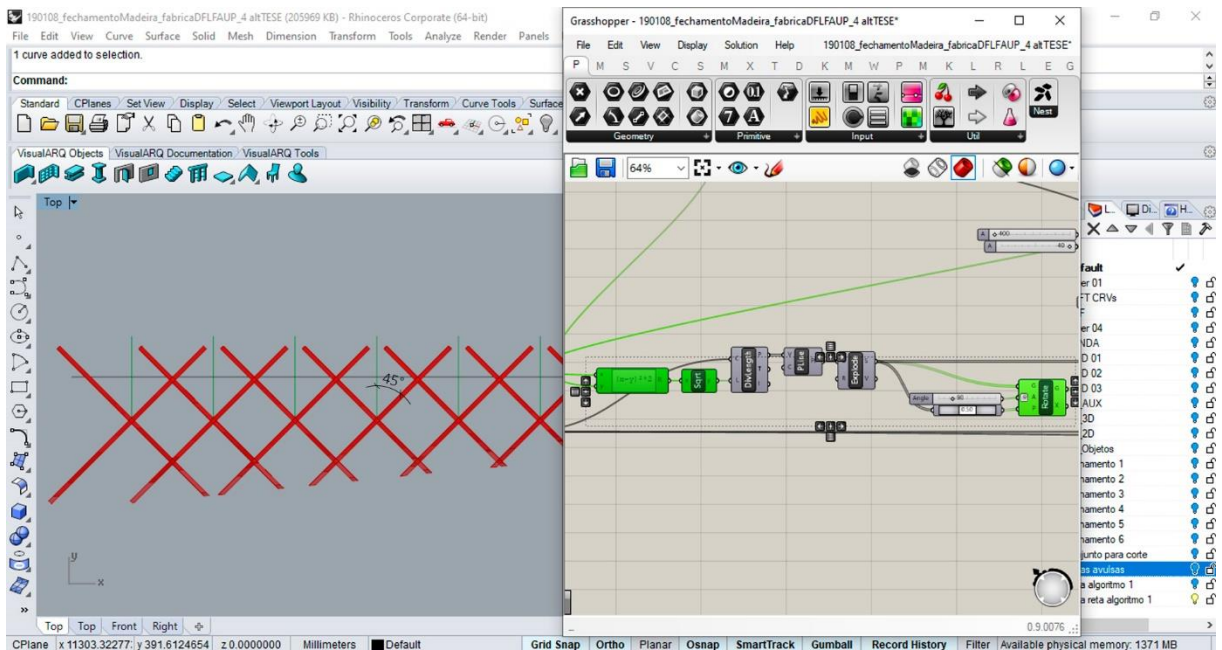
Figura 97 – Superfície parametrizada para corte das extremidades das placas de *MDF*.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

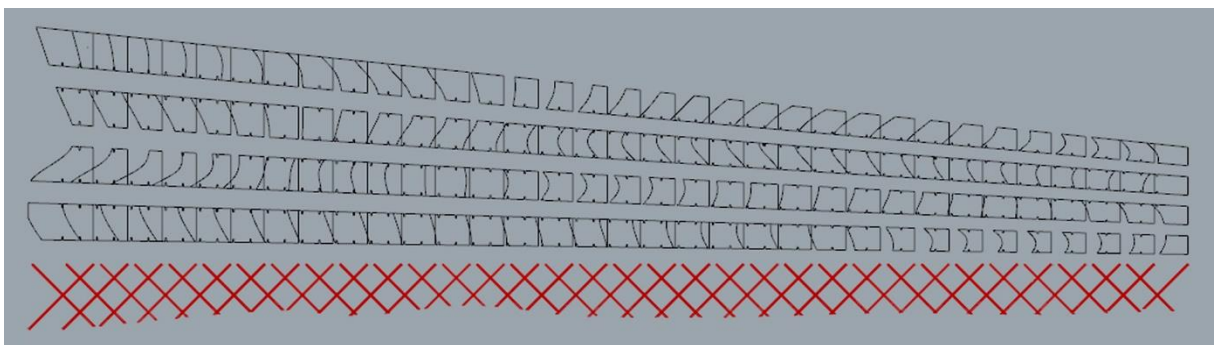
Para otimização do esquema de fabricação robótica, pensou-se um sistema de encaixes com ângulos entre as placas sempre a quarenta e cinco graus, deixando a fresagem mais complexa apenas para as extremidades das placas. Portanto, uma segunda adaptação foi acrescida ao sistema generativo original do fechamento em papelão, por meio de um algoritmo de cálculo do ângulo correto de posição entre as placas. (Fig. 98)

Figura 98 – Ajuste do ângulo 45° para posicionamento das placas entre si.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Figura 99 – Planificação das linhas de corte de cada uma das placas.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Incluiu-se no algoritmo a planificação de todas as linhas de corte de cento e trinta e duas peças únicas. (Fig. 99)

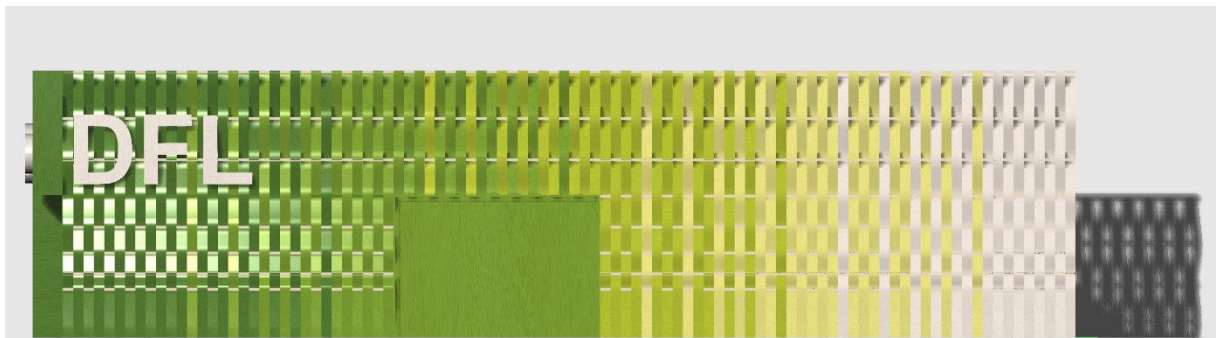
Nesse momento, um terceiro pesquisador se juntou à equipe, apresentando uma proposta, modelada no *Rhinceros*®, de uma parede porosa, usando um esquema de entrelaçamento de tiras finas flexíveis de *MDF*. Tais tiras seriam curvadas a partir de montantes horizontais que atuariam como seus espaçadores e, ao mesmo tempo, configurariam uma estrutura de suporte. (Fig. 100)

Figura 100 – Perspectiva renderizada do modelo 3D do fechamento em *MDF* entrelaçado.



2019. Crédito da imagem: *DFL FAUP*.

Figura 101 – Vista frontal renderizada do modelo 3D do fechamento em *MDF*.



2019. Crédito da imagem: *DFL FAUP*.

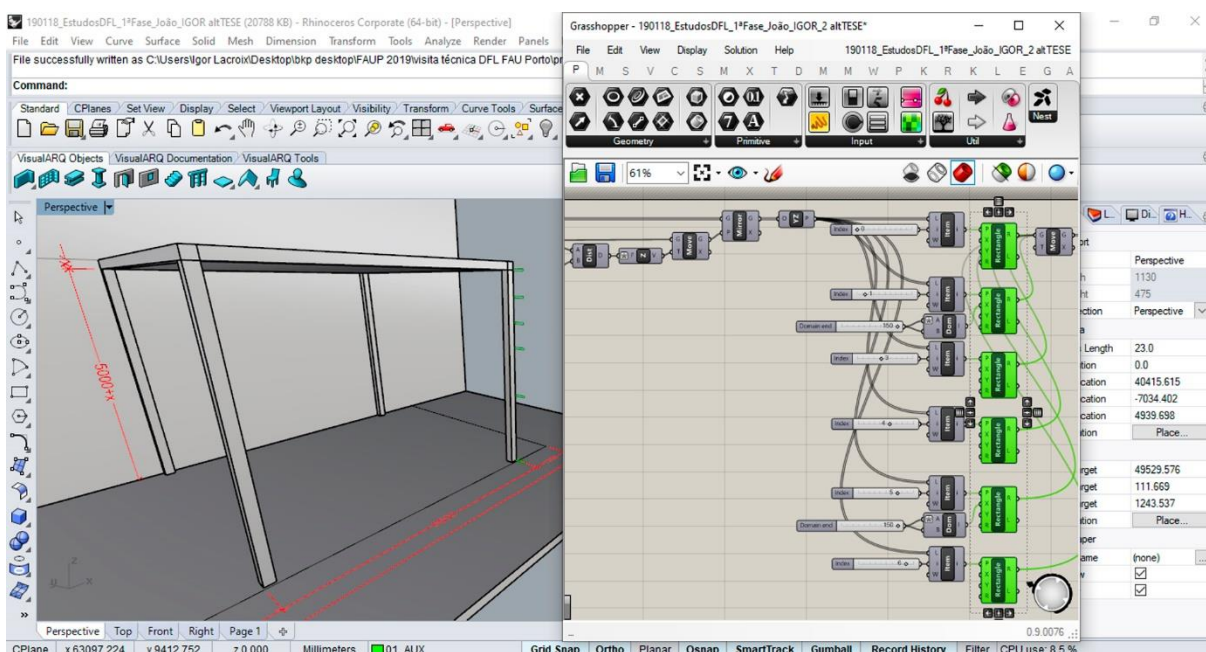
A partir dessa segunda fase de produção, o professor supervisor orientou as novas soluções, optando, finalmente, pela terceira proposta a ser desenvolvida. A direção foi incluir maior funcionalidade ao espaço de trabalho do laboratório de fabricação robótica, projetando-se portas e aberturas que permitissem o fluxo de pessoas e materiais. A ideia era criar um espaço mais ligado à identidade do próprio *DFL*. (Fig. 101)

Para os estudos de detalhamento, a equipe propôs dois protótipos, um que poderia testar o esquema estrutural de uma parte do fechamento de tiras travadas entre si e outro que poderia apresentar a proposta como um todo. Para o primeiro protótipo, o segundo pesquisador montou um sistema generativo no *Grasshopper*® para planificação das tiras onduladas, de tal forma que suas linhas de contorno planificadas pudessem ser cortadas em papel, em escala 1:25, em um *plotter* de

recorte *Silhouette CAMEO*. Para o segundo protótipo, o terceiro pesquisador montou um modelo no *Rhino*® para impressão 3D em uma máquina *MakerBot Replicator 2*.

Implementou-se rapidamente o primeiro protótipo. Após a montagem da definição *Grasshopper*®, gerou-se automaticamente os vetores que a máquina de corte reconheceria. O primeiro passo da modelagem algorítmica foi desenhar os perfis que criariam as linhas para modelagem das tiras entrelaçadas (Fig. 102). Tais perfis, medindo, a princípio, trinta centímetros de comprimento por cinco centímetros de largura, foram modelados de acordo com as dimensões dos supostos elementos estruturais em madeira que seriam utilizados para o próprio entrelaçamento das tiras.

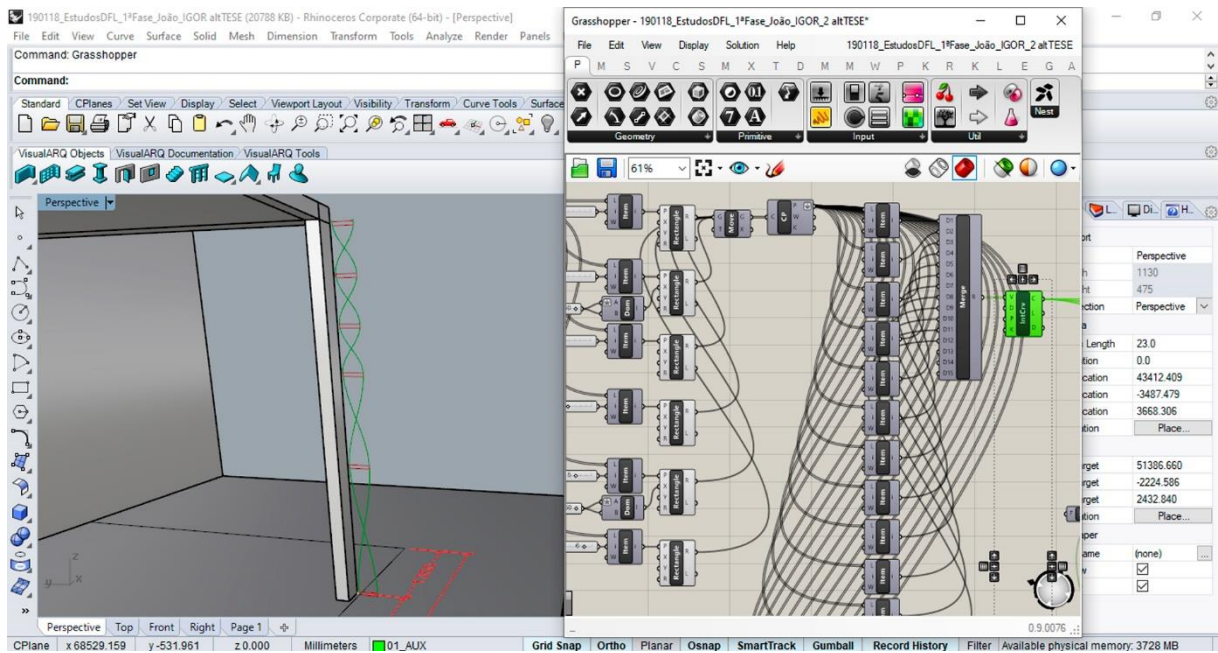
Figura 102 – Primeiro passo do modelo algorítmico de entrelaçamento, desenhar os perfis para criar as tiras entrelaçadas.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

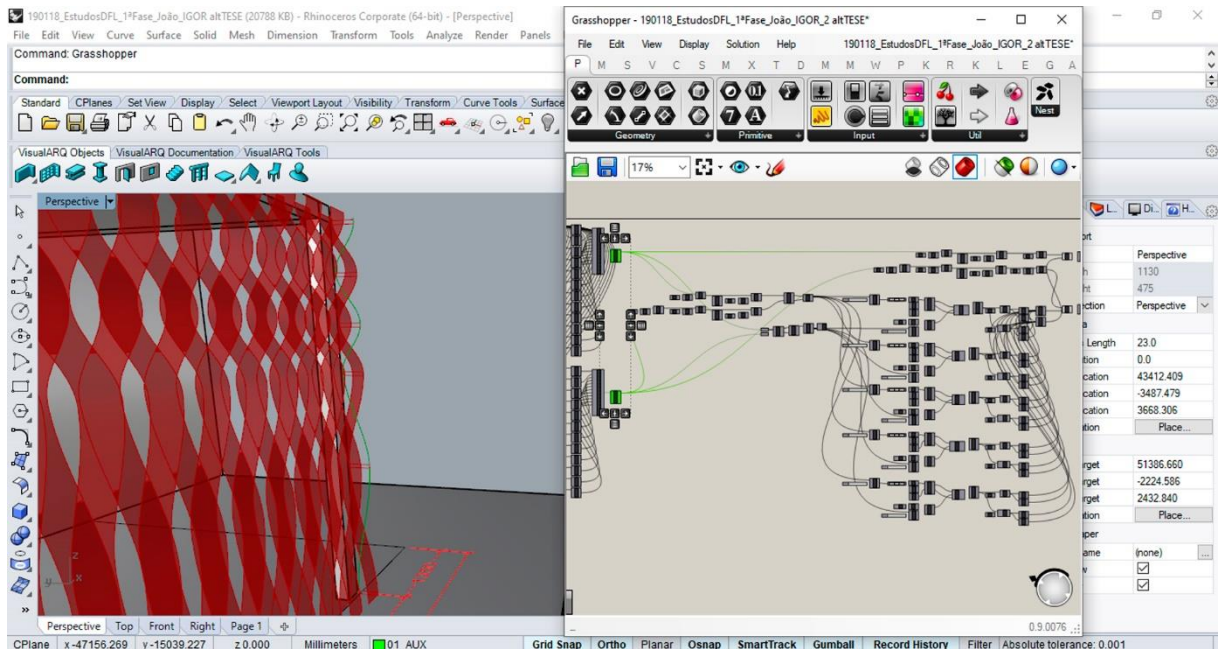
A partir dos perfis modelados, em um segundo passo da modelagem algorítmica, ocorreu um processo de seleção ordenada de seus respectivos vértices para desenho das duas curvas simétricas geradoras das tiras. Tais curvas permaneceram, desse ponto em diante, parametricamente associadas aos elementos estruturais, ou seja, seriam modificadas geometricamente na medida da modificação dos próprios perfis. (Fig. 103)

Figura 103 – Segundo passo do modelo algorítmico de entrelaçamento: desenhar curvas parametrizadas para criar as tiras entrelaçadas.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

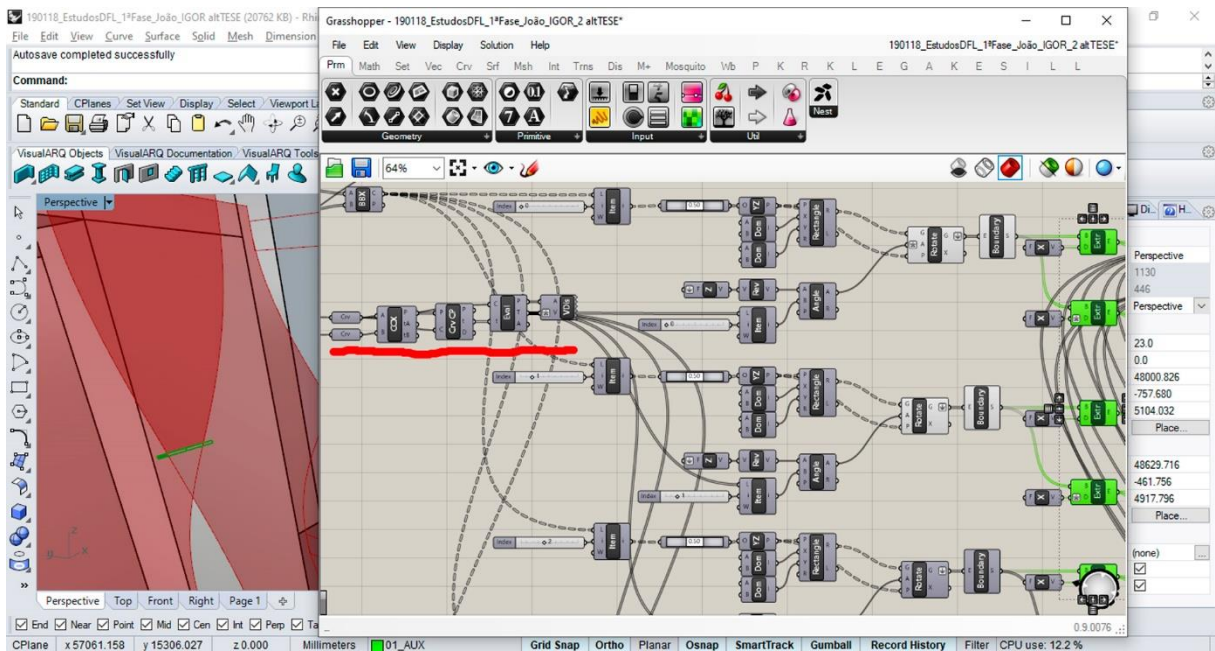
Figura 104 – Terceiro passo do modelo algorítmico de entrelaçamento: esquema da definição *Grasshopper*® para modelagem das tiras entrelaçadas.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

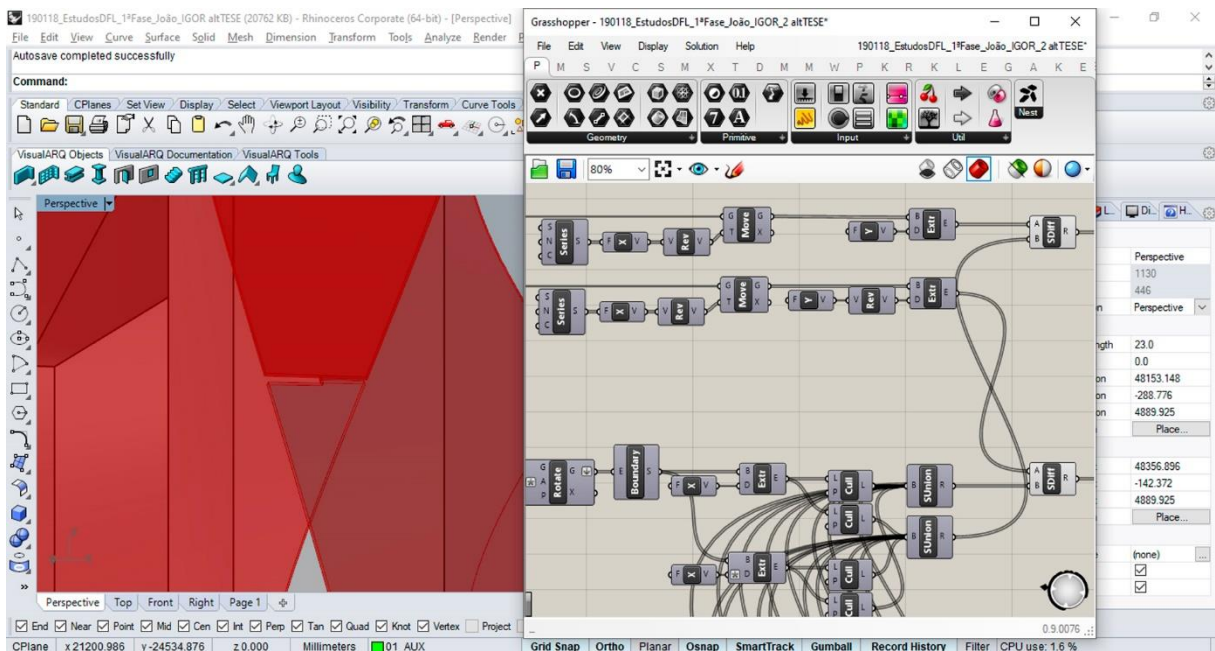
O terceiro passo foi a criação das tiras com espessura de dois milímetros (Fig. 104), imaginando-se um processo de conexão entre as próprias chapas onduladas.

Figura 106 – Elementos prismáticos para corte dos encaixes entre as tiras, parametrizados com ângulo de rotação dado pela tangente nos pontos de interseção.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Figura 107 – Modelagem algorítmica dos encaixes entre as tiras.

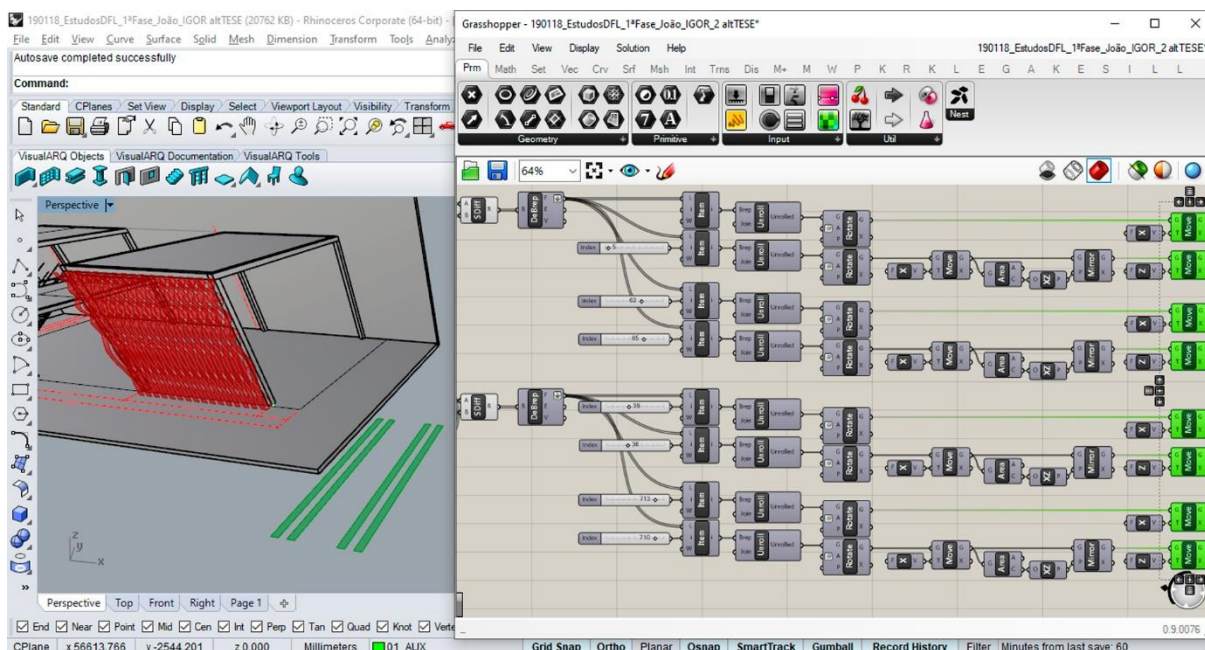


2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

A partir daí modelou-se as tiras com a espessura de dois milímetros do suposto material em *MDF* flexível, que seria utilizado na execução do fechamento, para que se pudesse criar os encaixes pelo corte dos elementos prismáticos anteriormente modelados. (Fig. 107)

O último passo desta definição *Grasshopper*® foi o processo de planificação das tiras para posterior fabricação com a *plotter* de recorte, que foi parametrizado de acordo com as propriedades geométricas de cada tira, onde, para cada modificação, o sistema generativo modificaria automaticamente todas as peças planificadas. Foram planificadas apenas quatro tiras, as duas das extremidades e apenas duas da parte interna do fechamento, uma vez que o restante delas configurou repetições umas das outras, o que otimizou o próprio cálculo de processamento do algoritmo. Tais peças planificadas foram, então, transformadas em geometrias do *Rhinoceros*® pelo comando *bake* do *Grasshopper*® para que, desta forma, possibilitassem a conversão de suas linhas de contorno em vetores para controle da máquina. (Fig. 108)

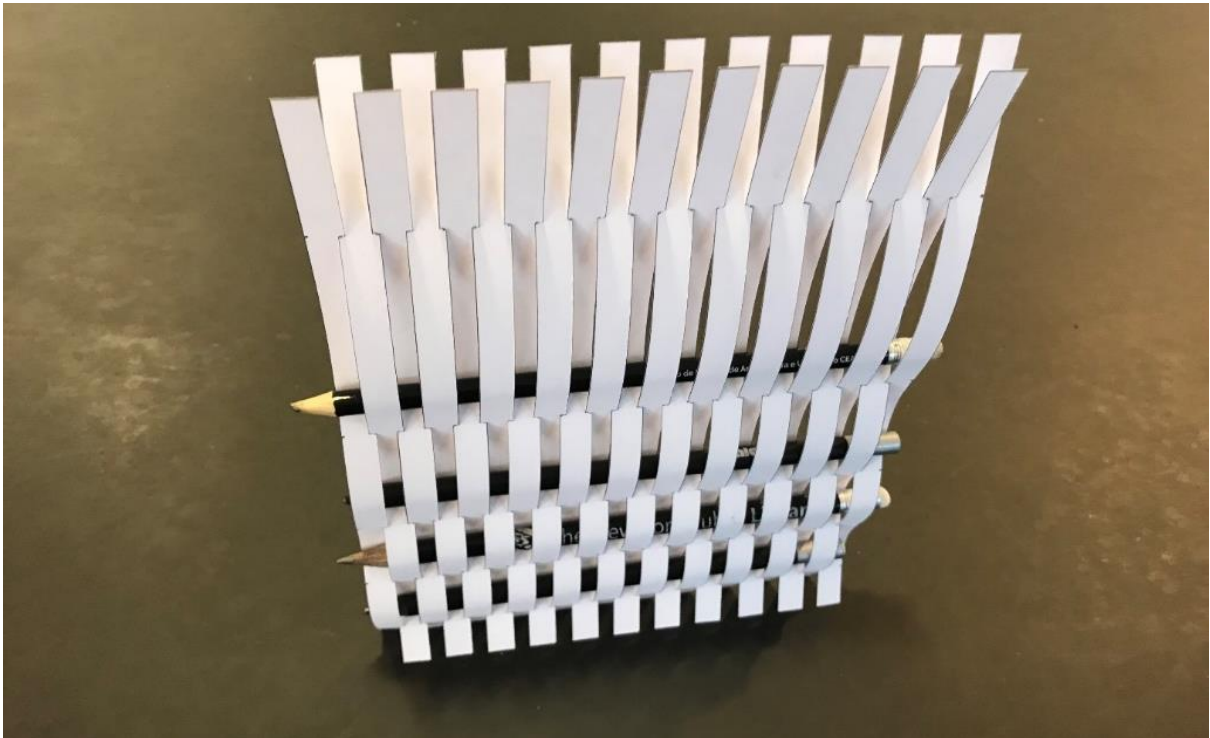
Figura 108 – Último passo do modelo algorítmico de entrelaçamento: planificar as tiras para posterior fabricação digital.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

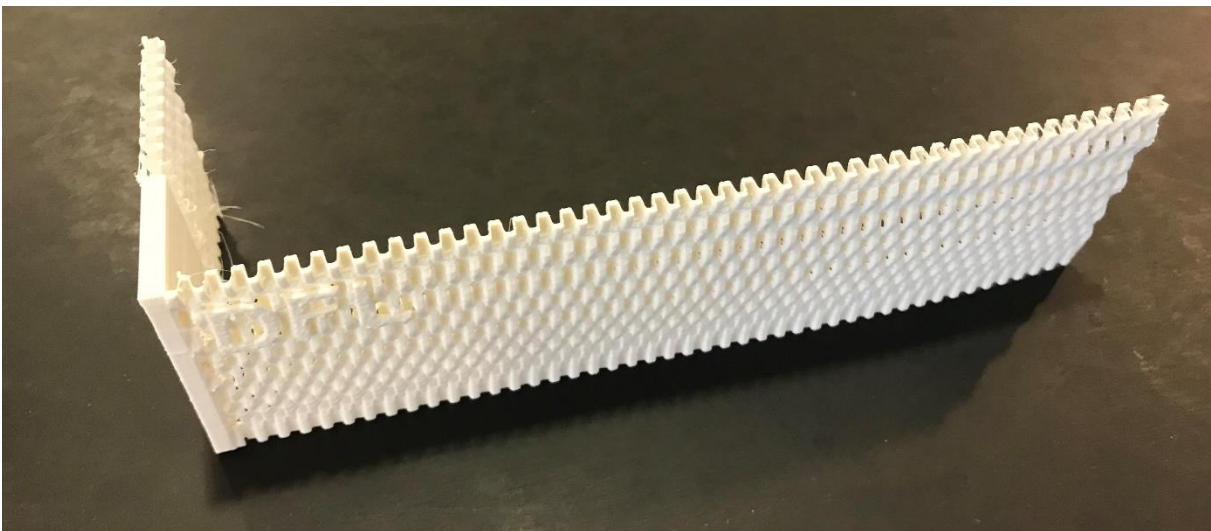
A partir daí, bastou abrir os vetores no *AutoCAD*®, colocá-los na escala correta e transferi-los para a máquina. Após o corte CNC, montou-se manualmente as tiras de papel, possibilitando verificar a resistência dos encaixes. Os espaçadores horizontais foram simulados por meio de lápis, atuando como pesos sobre as tiras que, naturalmente, encontraram um sutil ponto de equilíbrio pela distribuição das cargas. (Fig. 109)

Figura 109 – Foto do primeiro protótipo feito em *plotter* de recorte de papel, em escala 1:25.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Figura 110 – Foto do segundo protótipo feito por impressão 3D de plástico *PLA*.



2019. Crédito da imagem: *DFL FAUP*.

O segundo protótipo, também produzido com agilidade suficiente, permitiu a visualização da composição completa dos fechamentos em “L” que conformariam o espaço do laboratório. (Fig. 110)

O projeto considerou uma série de fatores, como o esquema de cores que compõe o painel entrelaçado, um gradiente que começa na cor branca, mantendo tons esverdeados até o último tom verde escuro. Considerou também um esquema de acesso para caracterizar duas funções: a entrada principal de pessoas e uma entrada de serviço para carga e descarga de materiais.

O projeto ainda está em desenvolvimento pela equipe do *DFL*. As últimas decisões, antes da finalização desta etapa da pesquisa, foram sobre a montagem de um *mock-up* em escala real para teste de desempenho dos materiais e sobre a melhor disposição dos acessos e portas, ainda caracterizando um aspecto estético do conjunto. Evidentemente, novas decisões serão tomadas até a construção do esquema de fechamento.

4.1.1.1 – Visita ao ISCTE-IUL Instituto Universitário de Lisboa

Paralelamente ao trabalho experimental no *DFL*, realizaram-se duas visitas a centros de ensino portugueses de pós-graduação em Arquitetura. A primeira delas foi realizada ao ISCTE-IUL – Instituto Universitário de Lisboa, onde foi entrevistada a Professora Doutora Alexandra Paio. A entrevista ocorreu no laboratório de fabricação digital da instituição, chamado *Vitruvius FabLab* que conta com uma variedade de máquinas CNC, tais como corte a laser, fresadoras de grande porte, impressoras 3D e, inclusive, um braço robótico *KUKA LBR iiwa 7R800* para colaboração humano-robô.

O objetivo da visita foi apresentar a mesma proposta compartilhada com o diretor do *DFL*, que contava também com o portfólio dos trabalhos produzidos nesta pesquisa de doutorado. Diante da apresentação, a professora expressou opinião semelhante ao professor do Porto, evidenciando a inviabilidade financeira do uso da robótica para construção de habitações de baixo custo, o que não justificaria a aplicação da tecnologia.

Além disso, a professora demonstrou interesse no portfólio apresentado, principalmente em relação às estruturas leves, uma vez que o ISCTE-IUL tem pesquisa exatamente na área de intervenções em territórios metropolitanos. Portanto, detectou-se uma afinidade de pesquisa que poderia ser aprofundada em outra oportunidade.

4.1.1.2 – Visita à Universidade de Coimbra

A segunda visita foi realizada à Universidade de Coimbra que contava, nesse momento, com a presença do Professor Doutor Paulo Eduardo Fonseca de Campos, a quem foi feita a terceira apresentação da proposta mencionada anteriormente. O encontro foi realizado no Centro de Documentação 25 de Abril, da própria universidade, onde houve a oportunidade de uma longa conversa com o professor de São Paulo – SP.

Mesmo concordando com os outros dois professores entrevistados sobre a inviabilidade da aplicação da robótica para construções de baixo custo, o professor paulista trouxe contribuições importantes. Do ponto de vista conceitual, poderia se afirmar que, por definição, não há distinção entre fabricação digital e fabricação robótica, uma vez que se poderia considerar qualquer máquina CNC como um robô controlado por computador. De fato, a própria marca *MakerBot* induz a essa compreensão, intitulado suas impressoras 3D como robôs fazedores.

Outra contribuição foi a apresentação do próprio professor entrevistado sobre o trabalho de pesquisa que vem realizando dentro da área da argamassa armada, ou micro concreto de alto desempenho, o microCAD. Campos (2013) atualizou a definição do material muito utilizado por Lelé, demonstrando, assim, uma afinidade com a pesquisa aqui realizada. Além disso, apresentou diversos projetos já realizados para construções de interesse social, demonstrando mais uma vez o alinhamento com a presente investigação.

4.1.2 – Perspectiva luso-brasileira sobre produção digital

Afirma-se o papel do *DFL FAUP* na regionalização da fabricação digital, diante das diversas instituições europeias que desenvolvem pesquisa dentro da área da robótica aplicada à construção civil. Todos os processos lá vivenciados foram decisivos para o direcionamento da etapa final desta pesquisa, o terceiro e último experimento que será apresentado no próximo capítulo. Demonstraram também a importância de se pensar a utilização de tecnologias avançadas para arquitetura. Conforme Sousa (2015):

Com esse novo advento tecnológico, arquitetos podem explorar um mundo expandido de projeto e soluções materiais em todas as escalas para enfrentar os desafios críticos do nosso período histórico. Ao mesmo tempo, os fornecedores de material e empresas construtoras que procuram se

manterem inovadores e competitivos estão abraçando esse novo paradigma de produção⁴⁷ (SOUSA, 2015, p. 6, tradução nossa).

O laboratório de fabricação digital do ISCTE-IUL demonstrou grande potencial produtivo com uma variedade de máquinas à disposição de estudantes de todos os níveis de graduação e pós-graduação. As pesquisas ali realizadas apontaram outras direções em relação ao *DFL FAUP*, sendo mais voltadas para a participação social, considerando aspectos econômicos da produção digital e sua relação com comunidades menos favorecidas. Um dos projetos de pesquisa do ISCTE-IUL, intitulado *Emerg.cities4all*, procurou ajudar na solução do problema habitacional em diferentes regiões do planeta, como Brasil, Angola e Guiné-Bissau. Alexandra Paio afirmou que a pesquisa “[...] é baseada na suposição de que é possível gerar soluções urbanas e projeto de habitação de baixo custo customizados em massa, que sejam modulares, redimensionáveis, adaptáveis e acessíveis (DUARTE, 2005), se se amparar em ferramenta de geração computacional [...]”⁴⁸ (PAIO, 2011, p. 157, tradução nossa).

A pesquisa realizada pelo Professor Doutor Paulo Eduardo Fonseca de Campos também se encontra alinhada com as pesquisas do ISCTE-IUL. A preocupação com o atendimento de comunidades desprovidas de infraestruturas urbanas por meio da utilização de tecnologias digitais disponíveis ao público é evidente no projeto das calçadas drenantes. Daniella Naomi Yamana [et al.] (2017) informam que:

[...] o grupo de pesquisa DIGI-FAB da FAUUSP vem trabalhando no redesenho de fôrmas para a galeria de microconcreto, de modo a que ela possa ser construída utilizando-se uma fresadora CNC de grande formato. Esse equipamento, assim como a impressora 3D, cortadora a laser, cortadora de vinil e fresadora de precisão, fazem parte do maquinário básico de um *Fab Lab* (nome derivado do termo em inglês Fabrication Laboratory), estando disponível em todos os laboratórios da rede mundial criada no início dos anos 2000 [...] (YAMANA [et al.], 2017).

⁴⁷ Original: “With this new technological advent, architects can explore an expanded world of design and material solutions at all scales to face the critical challenges of our age. At the same time, the building material and construction companies that seek to stay innovative and competitive are embracing this new production paradigm.” (SOUSA, 2015, p. 6).

⁴⁸ Original: “Our research is based on the assumption that is possible to generate modular, scalable, adaptable and affordable mass-customization (Duarte, 2005) solutions for urban and low-income housing design if supported by a computational generation tool [...]” (PAIO, 2011, p. 157).

Sobre a contribuição do professor paulista a respeito da definição de robótica, esta pesquisa ainda manteve o conceito de fabricação digital como mais amplo, mesmo que se concorde que em realidade poderia se compreender toda a produção controlada pelo computador como uma produção robótica. Porém, a decisão de compreendê-las distintamente foi para expressar o avanço que a fabricação robótica trouxe dentro do panorama da produção digital em arquitetura, distinguindo-a das demais tecnologias CNC, que já são mais acessíveis no contexto global.

Todas as visitas realizadas nas instituições portuguesas demonstraram que a intersecção entre tecnologia e arquitetura está cada vez mais palpável às necessidades reais de aplicação e que as pesquisas experimentais orientadas nesse campo são cada vez mais prementes. A prática arquitetônica passa por uma adaptação de escala industrial que redefine, inclusive, seus aspectos sociais, tornando-se cada vez mais urgente a inserção de técnicas computacionais avançadas na disciplina, desde o projeto até a construção. Tal observação induz à relevância de se introduzir essas técnicas ao ensino superior de arquitetura de maneira mais sistemática, pelo menos dentro do contexto brasileiro, onde já se discute sobre o assunto, mas ainda não se assumiu de maneira mais ampla nos currículos acadêmicos.

Com relação ao projeto desenvolvido no *DFL*, observou-se que desde o início das atividades houve uma preocupação constante com a racionalização dos processos construtivos, independente das tecnologias que seriam utilizadas. Não há o uso gratuito da tecnologia avançada, mas um processo crítico de consideração material e suas limitações de fabricação. A qualidade arquitetônica e sua relação com as pessoas são prioritárias em relação ao uso tecnológico, havendo um posicionamento crítico sobre a mera aplicação tecnológica, o que corroborou atitude semelhante àquela adotada na produção das estruturas leves que foram apresentadas no segundo experimento de produção digital.

No caso, o projeto paramétrico no *Grasshopper*® nem sempre respondeu às melhores decisões projetivas, mas em alguns momentos, principalmente para a produção do protótipo em papel, foi fundamental para se alcançar agilidade e precisão necessárias.

A fabricação digital foi considerada desde o princípio tanto para a hipotética execução do fechamento real quanto para a confecção dos protótipos. De fato, todo o

processo projetivo foi orientado para a produção digital, o que requereu atenção ao material e ao método construtivo desde o princípio. Kolarevic (2015) expressou com clareza tal processo:

Os vários processos de fabricação digital proveram aos projetistas uma capacidade sem precedente de controlar os parâmetros da produção material, e de criar com precisão os efeitos materiais desejados. O conhecimento dos recursos e disponibilidade de produção de determinados equipamentos de fabricação e montagem robótica acionados digitalmente permite que os projetistas projetem especificamente as capacidades dessas máquinas. A consequência é que os projetistas estão se envolvendo muito mais diretamente nos processos de fabricação, pois criam os dados de controle que acionam as máquinas⁴⁹ (KOLAREVIC apud SOUSA, 2015, p. 4, tradução nossa).

Além da principal referência de projeto, o pavilhão de pesquisa mencionado no início deste capítulo, desenvolvido no instituto alemão dirigido por Achim Menges, um outro experimento foi referenciado, também projetado pelo grupo de Stuttgart, um estudo de entalhe *finger-joint* fabricado roboticamente para placas de madeira (KRIEG, 2011). Tais referências influenciaram diretamente o projeto desenvolvido no *DFL*, no entanto, não houve tempo de pesquisa suficiente para se avançar em uma experimentação direta com o braço robótico, para processamento das tiras em *MDF* descritas anteriormente.

Outras referências foram consideradas, tais como “*The Informed Wall*” (BONWETSCH [et al.], 2006) e “*Mesh Mould*” (HACK [et al.], 2014), ambos experimentos produzidos pelo laboratório suíço dirigido por Fabio Gramazio e Matthias Kohler, mas não influenciaram diretamente o projeto aqui apresentado. Primeiramente, porque se constituíram em experimentações com materiais muito distintos do *MDF*, segundo, porque envolveram um grau mais elevado de complexidade geométrica que resultou em processos menos pragmáticos do ponto de vista de sua programação computacional.

⁴⁹ Original: “*The various processes of digital fabrication have provided designers with an unprecedented capacity to control the parameters of material production, and to precisely craft the desired material effects. Knowing the production capabilities and availability of particular digitally-driven fabrication and robotic assembly equipment enables designers to design specifically for the capabilities of those machines. The consequence is that designers are becoming much more directly involved in the fabrication processes, as they create the control data that drives the machines.*” (KOLAREVIC apud SOUSA, 2015, p. 4).

4.1.3 – Considerações sobre a viabilidade da fabricação robótica

Tendo em vista o quadro geral do trabalho de pesquisa realizado no *DFL FAUP* para esta tese, compreendeu-se que, primeiramente, houve o estabelecimento de um diálogo entre pesquisa acadêmica e demandas industriais e que, em segundo lugar, tal contexto específico apresentou diferentes demandas de projeto com a finalidade de resolução pragmática dos problemas em questão, ou seja, uma tendência à busca de racionalização dos métodos de produção. Por outro lado, ao se analisar a maneira como ocorreu a aplicação do braço robótico para construção arquitetônica durante o estágio de doutorado no laboratório referido, compreendeu-se que mesmo que o braço robótico não tenha sido aplicado na prática, os projetos tenderam a associar o seu princípio para resolução de alguns dos problemas construtivos, essencialmente para o corte e fresagem de *MDF*.

A relação entre pesquisa acadêmica e produção industrial é importante, pois, dessa maneira, a indústria mantém seu potencial inovador e a pesquisa mantém acesso a problemas de escala industrial. A partir desse ponto, apresentou-se uma perspectiva diferente da maioria dos laboratórios de pesquisa que trabalham com tecnologias avançadas para produção arquitetônica, pois, ao invés de buscarem a resolução de problemas comuns e demandas existentes, estão criando suas próprias demandas, ou seja, tendem a se afastarem das dificuldades mais cotidianas das populações.

Mesmo que os resultados alcançados pelos laboratórios referenciados sejam interessantes tanto do ponto de vista estético, quanto daquilo que é alcançável por meio da fabricação robótica, talvez estejam perdendo outras complexidades presentes, por exemplo, nos problemas habitacionais. Nesse sentido, confirma-se uma dedução assumida durante a revisão de literatura realizada sobre aplicação da robótica em arquitetura, de que a FAUP detém papel determinante, uma vez que se dedica à regionalização dos processos tecnológicos. Desta forma, abre uma oportunidade de associar tais processos em situações menos favorecidas economicamente, o que pode favorecer a utilização de um método de roteirização da produção digital nestas situações. Acredita-se que a pesquisa aqui realizada contribuiu no sentido de testar a viabilidade da aplicação de tecnologias avançadas nesses contextos.

Constatou-se que ainda é mais viável utilizar tecnologias menos avançadas, ou aquelas disponíveis no contexto específico, pois o custo de implementação do braço robótico ainda é elevado, mesmo que suas técnicas de controle já estejam acessíveis ao arquiteto. Uma outra constatação foi de que o *Grasshopper*® é um possível controlador do braço robótico, em conjunto com o *add-on KUKA/prc*® que era utilizado para controle do “Pacheco”, nome dado ao robô do *DFL*, conforme Sousa (2015, p. 20). Há uma variedade de outros *add-ons* de controle robótico que atuam muitas vezes independente da marca do maquinário. O que coloca a questão da modelagem algorítmica como fundamental para se ter acesso à tecnologia, possibilitando ao projetista criar os movimentos que o dispositivo reproduzirá seja para montagem, corte ou modelagem. Portanto, é um processo que pode ser conduzido pelo arquiteto, ou estudante de arquitetura, e cabe aprofundar o ensino de tal técnica na formação profissional, para maior domínio de *softwares* e máquinas controladas por computador.

CAPÍTULO 5

“[...] objetos não são mais desenhados, mas calculados.”⁵⁰

Bernard Cache (1995, p. 88, tradução nossa)

⁵⁰ Original em inglês: “[...] objects are no longer designed but calculated.” (CACHE, 1995, p. 88).

5.1 – Terceiro experimento: roteiro de produção digital de casa compartilhada por meio de processo CAEDM

Partindo da pesquisa realizada durante os anos de 2015 a 2019, elabora-se um roteiro produtivo que associa um método de projeto paramétrico a um processo de fabricação digital, vislumbrando a possível construção de uma casa compartilhada. O último experimento, aqui apresentado, é o projeto de uma habitação com cento e sessenta metros quadrados de área total coberta. Apresenta-se desde sua concepção à mão livre, passando pelo projeto parametrizado no *software Grasshopper®*, até a montagem de uma maquete palpável, onde se demonstra um roteiro de produção digital por meio de processo CAEDM.

O objetivo do roteiro é testar a inclusão de processos de engenharia e de fabricação digital no projeto de arquitetura afim de reproduzir os métodos construtivos de Lelé, por meio das técnicas atuais de projeto e execução, que são capazes de automatizar operações complexas envolvidas em tais métodos. Fez-se uma pesquisa experimental, no contexto de Brasília – DF, para testar, de fato, tais técnicas em práticas comuns e em construções funcionais, verificando, assim, limites e possibilidades, por meio da fabricação digital. O roteiro, portanto, apresenta um método de projeto de arquitetura associado às práticas construtivas.

Duas hipóteses são consideradas. A primeira, mais geral, é de que as técnicas de parametrização aqui experimentadas não são de conhecimento amplo entre arquitetos, logo, são pouco utilizadas na prática profissional cotidiana. A segunda, mais específica, é sobre a possibilidade de desenvolver um sistema *BIM* personalizado, independente dos programas standardizados, tais como *Revit®* ou *ArchiCAD®*, por meio da utilização do *software Grasshopper®*.

A tese é de que é possível reproduzir os processos de fabricação digital que Lelé utilizou no Beijódromo, por meio de recursos de programação que automatizam operações complexas, envolvidas nesses processos, criando um modelo de informação para construção. O objetivo é desvendar ao arquiteto, técnicas pouco conhecidas ou exploradas, mas que ao mesmo tempo são muito discutidas nos campos teórico e de pesquisa internacional, e demonstrar como aplicá-las à arquitetura.

Descreve-se aqui o projeto da casa compartilhada, realizado durante um ano, do início do segundo semestre de 2018 ao final do primeiro semestre de 2019, última

etapa de pesquisa que originou esta tese. Aborda-se desde a concepção e formulação do partido da casa, utilizando o desenho à mão livre; as primeiras modelagens ponto a ponto, no *software Rhinoceros®*; a modelagem paramétrica, no *software Grasshopper®*; até a montagem de uma maquete na escala 1:50, composta por peças cortadas a laser.

O resultado foi o roteiro de produção digital para projeto e fabricação de um modelo de habitação. O roteiro compõe uma definição *Grasshopper®* que, a partir da escolha de uma laje de cobertura, gera uma malha estrutural de pilares e vigas em aço, pré-dimensionados a partir de um cálculo empírico simples, a serem processados para posterior fabricação digital.

Tal definição é entendida aqui como um sistema generativo, orientado por um processo *CAE-CAD-CAM (CAEDM)*. O sistema é aberto para se investigar sobre a melhor forma e distribuição dos pilares, de acordo com a área desejada para a casa, e reage automaticamente, transformando desde a dimensão das peças até suas respectivas etapas de fabricação, para cada forma escolhida.

5.1.1 – A estrutura como partido arquitetônico

Pensar um sistema de habitação a partir de sua estrutura isoladamente é uma ação que, ao procurar resolver a principal dificuldade construtiva, abre a possibilidade de uma ocupação personalizada para cada habitante. O que poderia ser feito posteriormente à suposta construção da estrutura, da maneira como o habitante desejar, não diferindo, assim, de sistemas como *Quonset Hut*, *Instant House*, *WikiHouse* (Fig. 111).

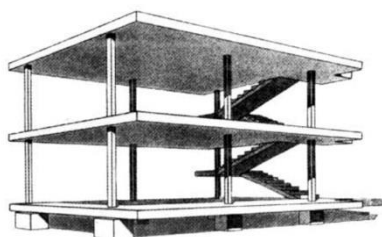
Figura 111 – *Quonset Hut*, *Instant House* e *WikiHouse*.



Crédito das imagens: *US Government*, Lawrence Sass e Marcel Botha e Margaux Carron, respectivamente.

Por outro lado, ao se pensar essa essência estrutural, mantém-se a vantagem de deixar a ocupação independente do próprio sistema estrutural, possibilitando ao habitante escolher qualquer tipo de fechamento (alvenaria, dry wall, placas cimentícias, vidro), laje de cobertura (nervurada, alveolar, vigota/lajota, moldada in loco), telhado etc. Nesse sentido, refere-se à *Maison Dom-Ino* de Le Corbusier (Fig. 112), tanto em relação à essência estrutural do sistema construtivo da casa, quanto ao pensamento moderno de habitat. Eleanor Gregh (1979) descreveu o pensamento do arquiteto suíço quanto à concepção desse modelo de construção em concreto armado e afirmou o sentido de liberdade quanto à ocupação do referido modelo de casa, tanto das possibilidades de fachada, quanto de organização do espaço interior. Kenneth Frampton a definiu: “[...] como uma casa tão estandardizada quanto um dominó. Esse jogo adquiria a força de um quebra-cabeça literal, onde as colunas livres podiam ser vistas em planta como pontos de dominó, e onde o padrão de ziguezague de um agregado dessas lembrava a formação de um jogo de dominó.” (FRAMPTON, 1997, p. 183).

Figura 112 – *Maison Dom-Ino* de Le Corbusier.



2003. Crédito da imagem: Kenneth Frampton.

Tal ideia constituiu o partido do projeto da casa compartilhada, a partir de uma série de desenhos à mão livre e anotações em um *sketchbook*, realizados entre fevereiro de 2018 e julho de 2019, porém, considerou-se uma abordagem não estandardizada, diferentemente da proposta standard da *Maison Dom-Ino*. Durante o período, o projeto foi orientado principalmente pelo Professor Doutor Neander Furtado Silva, diretor do Laboratório de Fabricação Digital e Customização em Massa – LFDC, da FAU UnB. Contou também com a orientação especial do Professor Doutor José Pedro Souza, durante a fase final da concepção do projeto.

A principal referência que norteou o seguimento de tal partido foi a prática incremental de Alejandro Aravena. Apesar da controvérsia que existe na produção do

arquiteto chileno, apontada por Francisco Vergara Perucich e Camillo Boano (VERGARA PERUCICH; BOANO, 2016), o sistema utilizado em alguns de seus edifícios habitacionais apoiou a ideia de que o morador poderia se apropriar do espaço gerado por uma estrutura maior, no tempo e nas condições que tiver, sem perder as qualidades arquitetônicas do conjunto. (Fig. 113).

Figura 113 – Habitação Villa Verde 2010.



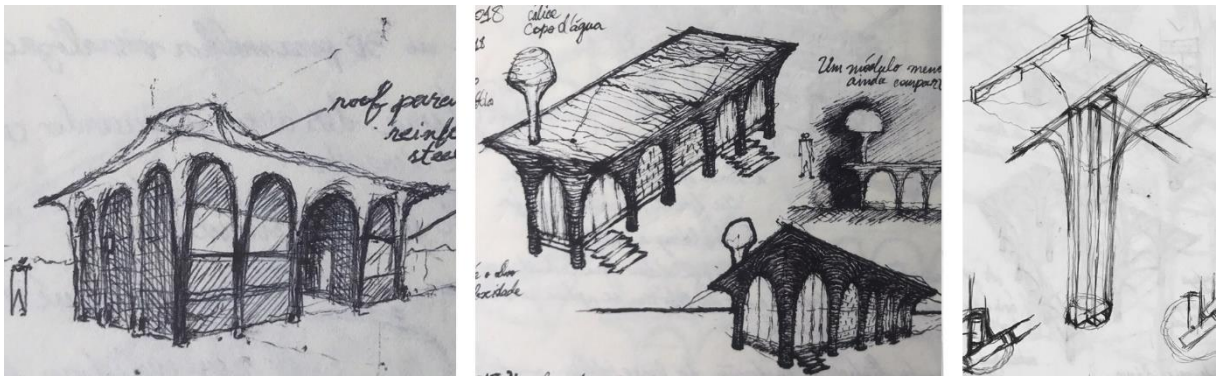
2016. Crédito da imagem: Suyin Chia.

A concepção do projeto se iniciou com um processo de *brainstorming* e livres associações, mas que logo se direcionou para uma solução construtiva de modulação por pilares. Os primeiros desenhos dessa fase representam uma estrutura construída por deposição de microconcreto de alto desempenho, ou microCAD, conforme definição de Campos (2013), tendo em vista a fabricação *contour crafting*, conforme o sistema criado por Behrokh Khoshnevis (2004).

Os desenhos representam um possível sistema personalizado de telhado, com pilares variando os vãos entre si e esquemas básicos de ocupação com paredes e janelas. Representam também detalhes de execução dos cantos da estrutura, conformados para receber as paredes em ângulos variados, e ainda indicam a possibilidade de uma caixa d'água sobre a laje de cobertura. (Fig. 114)

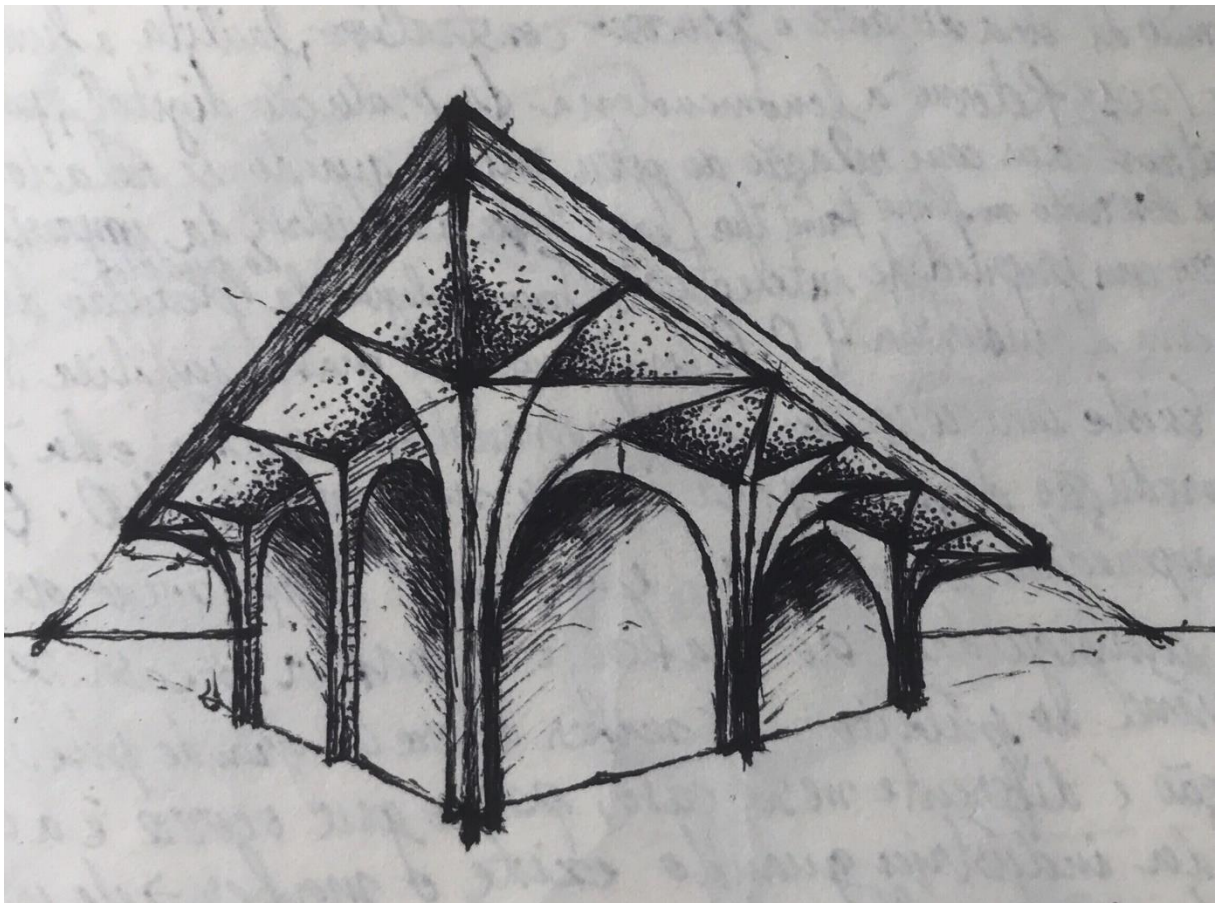
A partir da orientação do professor português, mudou-se a direção do sistema construtivo. Durante o estágio de doutorado concedido pelo *DFL*, verificou-se que a viabilidade de um sistema pré-fabricado ainda supera a utilização da fabricação por deposição *in loco*, cujo maquinário é caro e específico. Nesse sentido, voltou-se para o conhecimento adquirido pela experiência do próprio Lelé e a utilização do aço foi compreendida como a solução mais viável, tendo em vista, inclusive, a adequação ao contexto produtivo local.

Figura 114 – Croquis iniciais da estrutura em micro concreto.



2018. Crédito das imagens: elaborado pelo autor.

Figura 115 – Croqui da estrutura em aço.



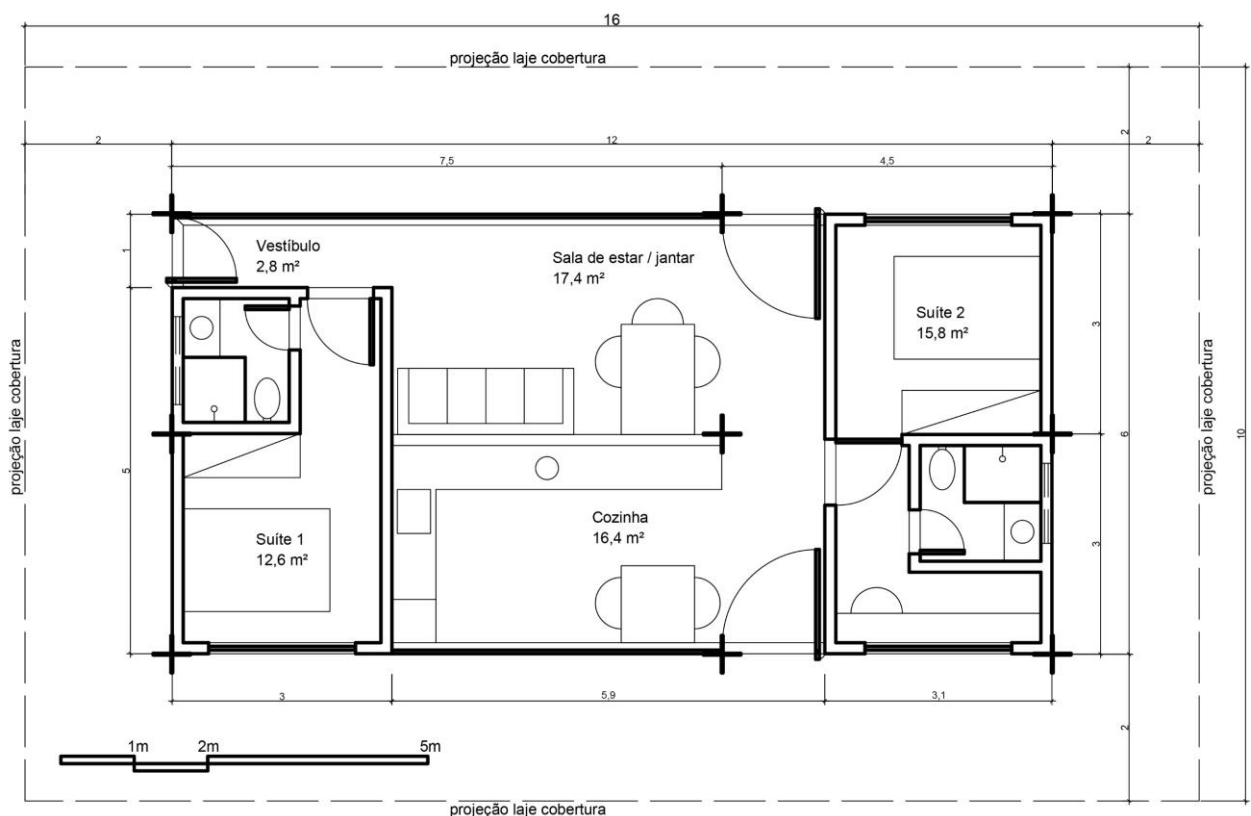
2018. Crédito das imagens: elaborado pelo autor.

Novos desenhos foram feitos para representar esquemas da estrutura em aço, mas ainda mantendo a solução de modulação por pilares (Fig. 115).

A etapa de desenho à mão foi imprescindível para a gestação da ideia, porém, uma vez que se chegou à decisão pelo sistema metálico, logo se iniciou o projeto de precisão, utilizando-se da modelagem tridimensional. No entanto, enfatiza-se aqui a relevância do traço à mão, que possibilitou uma concepção com maior liberdade e rapidez. O diário de anotações foi fundamental para a análise posterior e percepção da evolução do projeto, e nenhum modelo 3D foi feito sem antes uma visualização por croquis.

A partir daí, organizou-se o programa de necessidades básico da casa compartilhada, tendo em vista os sistemas compartilhados de locação imobiliária, como *Airbnb* e *CouchSurfing*. O que possibilitaria ao habitante compartilhar cômodos da sua residência com pessoas que necessitassem de moradia temporária. A residência seria composta por duas suítes independentes, uma delas associada a um pequeno escritório de atendimento, centralmente conectadas por uma sala e cozinha conjugadas. A planta baixa foi desenhada no *AutoCAD®* a partir da última geometria resultante do modelo algorítmico a ser detalhado nas próximas seções. (Fig. 116)

Figura 116 – Planta baixa da casa compartilhada, com esquema ilustrativo de ocupação.

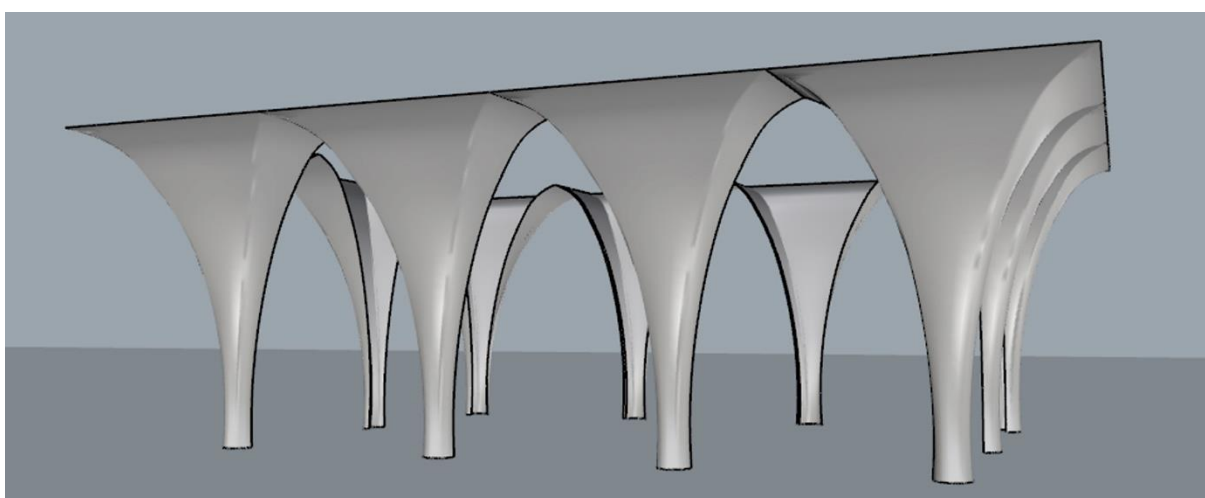


2018. Crédito das imagens: elaborado pelo autor.

5.1.2 – Modelos tridimensionais iniciais

O primeiro modelo 3D foi realizado no *software Rhinoceros®* para visualização rápida da proposta em microCAD, representando o pilar formado por uma base circular que se transforma até um topo quadrangular, onde se apoiaria a suposta laje de cobertura da casa. Internamente ao arranjo de pilares, o espaço seria aberto para construção de paredes e encaixes ortogonais, para facilitar os processos construtivos estandardizados. (Fig. 117)

Figura 117 – Modelo preliminar *Rhinoceros®* da estrutura em micro concreto.

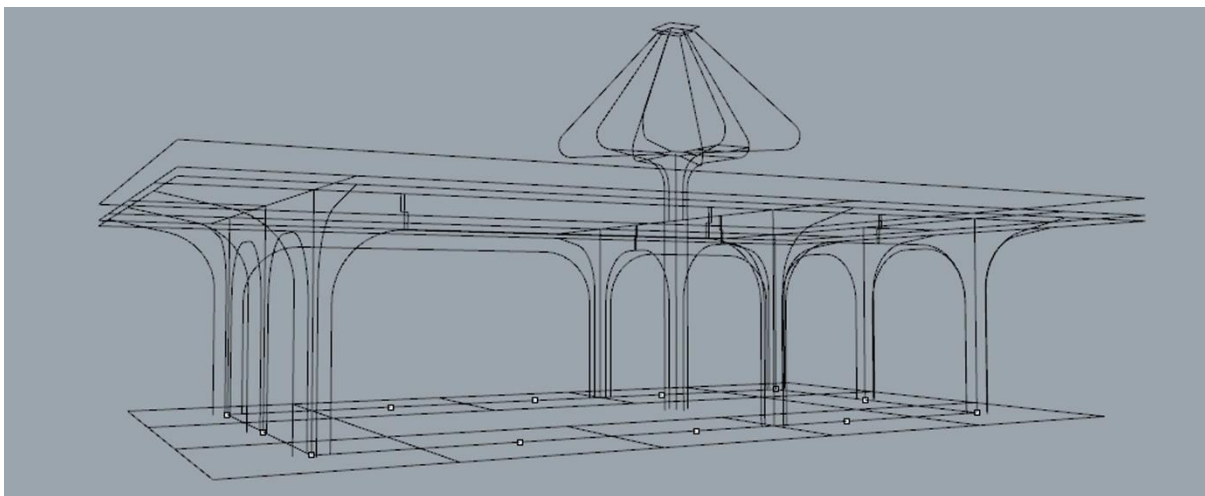


2018. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Como a ideia de construção em microCAD não foi validada durante a pesquisa, continuou-se um processo de modelagem ponto a ponto, ainda no *software Rhinoceros®*. O segundo modelo foi realizado de maneira mais detalhada, para visualização prévia do esquema metálico, com pilares em cruz que conformam arcos e vãos vencidos por vigas. O objetivo era analisar as proporções da casa em relação a um esquema de ocupação adequado, por exemplo, para uma pequena família.

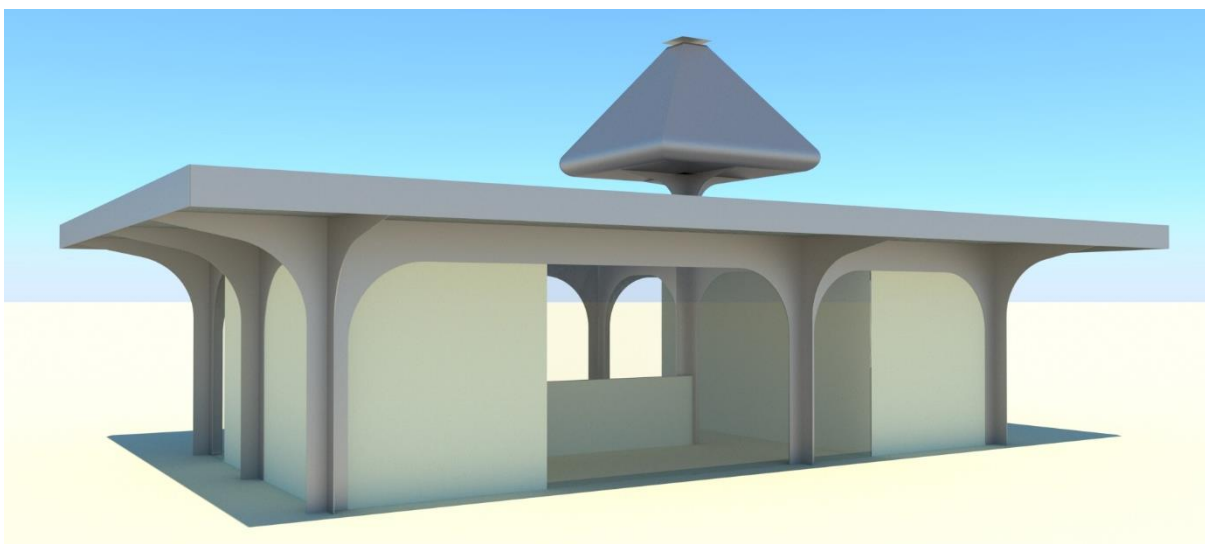
O segundo modelo foi essencial para a etapa posterior de modelagem algorítmica. A partir dele, informações importantes foram compreendidas e reproduzidas no algoritmo, como a maneira de chanfrar os cantos das linhas em noventa graus que conformam os arcos, ou a maneira de gerar as linhas para corte das superfícies que configurarão as peças da estrutura. O modelo representou a casa apenas por meio de linhas, sem superfícies ou espessuras, e ainda sem um exemplo de ocupação. (Fig. 118).

Figura 118 – Modelo preliminar *Rhinceros*® da estrutura em aço.



2018. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Figura 119 – Renderização ilustrativa da casa compartilhada.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

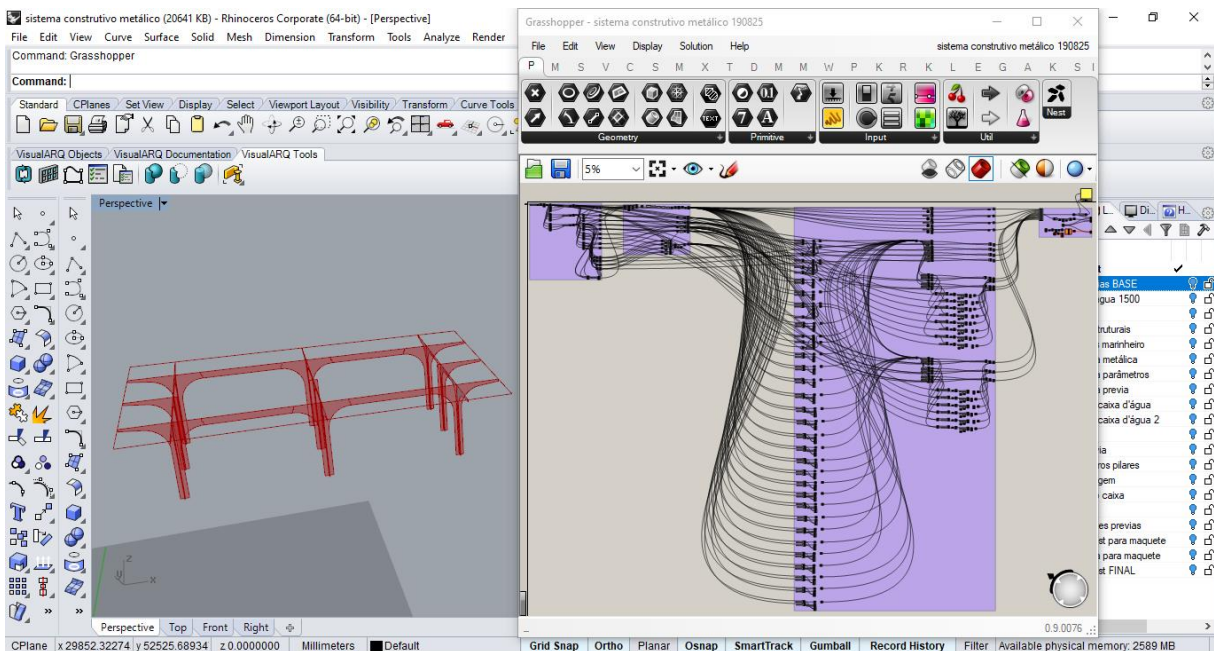
Apenas no terceiro modelo foi possível visualizar um esquema de ocupação com paredes, portas e janelas, e fechamentos em vidro (Fig. 119). As geometrias da estrutura foram manipuladas no *Rhinceros*® onde se modelou as espessuras dos pilares e vigas, e os outros elementos descritos, como conexões e parafusos, esquema preliminar de fundação e laje. Representou-se, também, uma proposta de caixa d'água, com uma licença poética formal que remete à importância dada a este elemento pela arquitetura moderna brasileira. Todos elementos apenas ilustrativos para uma percepção humanizada da casa.

Da mesma forma que os croquis foram fundamentais durante a etapa de concepção do projeto, a modelagem tridimensional, utilizando ferramentas e comandos, atribuindo valores e transformações geométricas ponto a ponto na área de trabalho do *software*, foi importante para a tomada de decisões e validação de ideias, além de que já antecipou muitos processos realizados durante a próxima etapa de modelagem algorítmica.

5.1.3 – Modelo algorítmico

Considera-se importante apresentar em detalhes como ocorreu a aplicação da modelagem algorítmica no projeto que já foi desenhado, modelado tridimensionalmente e, a partir da inclusão desta técnica, poderá ser detalhado milimetricamente e orientado para fabricação digital de maneira automatizada. Deve se ter em mente que a modelagem algorítmica pode ser complementada continuamente, podendo alcançar níveis aprofundados de detalhamento. Desta forma, o projeto aqui apresentado serviu apenas para testar esta tese e não foi detalhado em pormenores considerados secundários para o objetivo central do estudo. (Figura 120)

Figura 120 – Resumo da definição *Grasshopper*® para estrutura em aço.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Procurou-se pormenorizar a descrição das técnicas de programação para tornar acessível a compreensão da montagem da definição *Grasshopper*® em questão, em um nível intermediário de experiência com o *software*. Silva Jr. (2011) apresentou conhecimento importante sobre o funcionamento da interface e sua manipulação introdutória.

O processo se iniciou com a compreensão do programa de necessidades, elaborado em etapa anterior, e sua área correspondente de 72 m². Ao redor dessa área, projetou-se um beiral de dois metros de largura, para criar tanto uma circulação externa coberta quanto uma proteção de todas as fachadas contra a insolação direta. Então, ao programa básico foi acrescida uma área coberta externa de 88 m², totalizando 160 m² para a casa compartilhada.

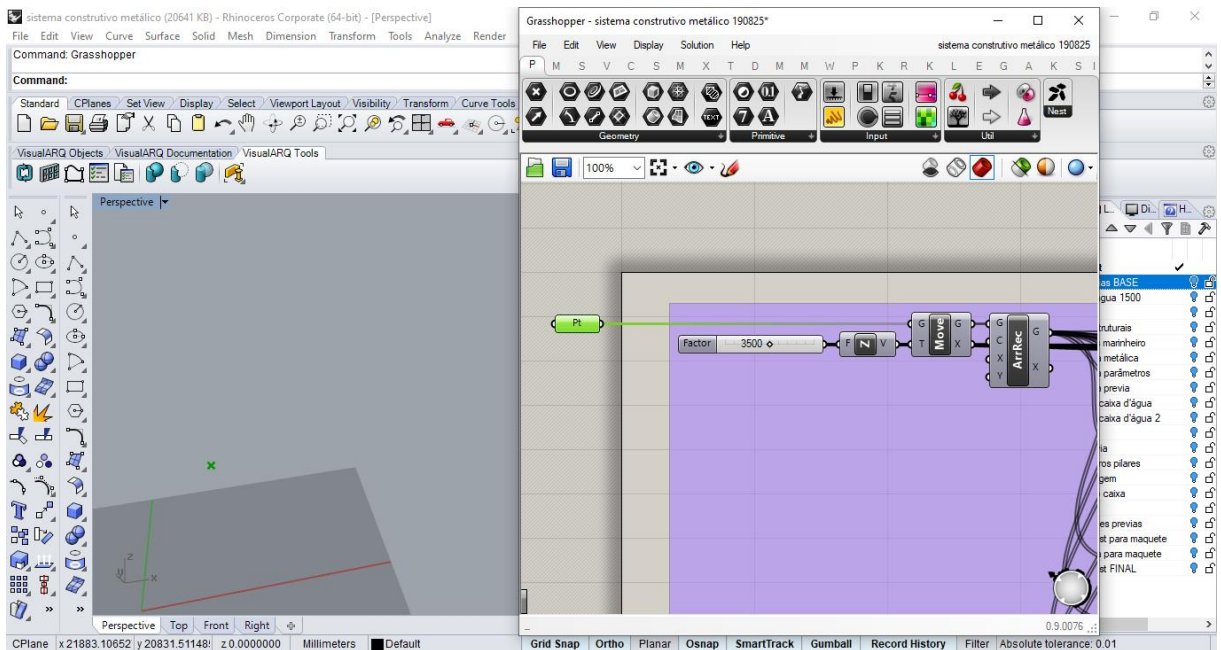
Tal área total corresponde à área de cobertura da laje e, conseqüentemente, à necessidade de um campo de pilares e vigas para apoiá-la. O objetivo inicial da definição foi criar um sistema generativo que interligasse, por meio de um cálculo estrutural simples, todos os elementos estruturais da casa: laje, vigas e pilares; conforme o programa completo do projeto, com espaço interno e beiral externo. A partir do pré-dimensionamento, todos os formatos dos elementos estruturais foram modelados para identificação, quantificação, planificação e organização para corte CNC.

5.1.3.1 – Primeira etapa da definição: modelagem das geometrias básicas

Nos termos da definição, o primeiro passo foi a escolha de um ponto de inserção do modelo, que a princípio pode ser qualquer ponto da preferência do projetista, dentro do espaço cartesiano XYZ da área de trabalho do *Rhinoceros*®, que atua como um visualizador da definição *Grasshopper*®. (Fig. 121)

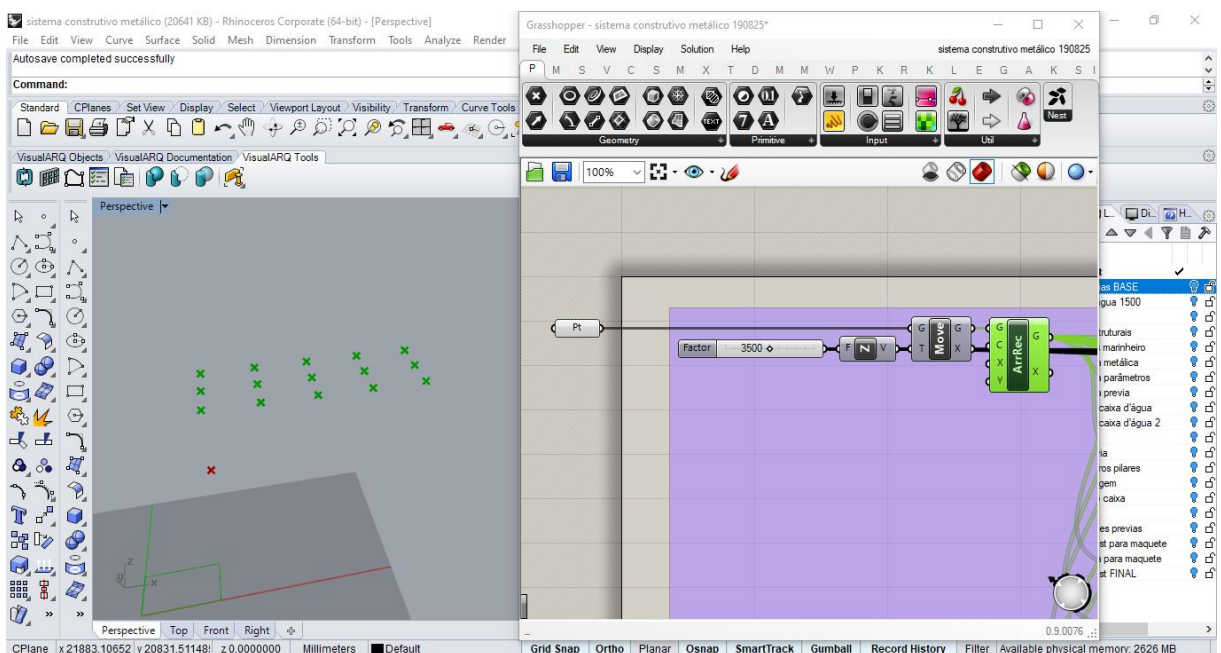
A partir daí, configurou-se a origem de uma matriz de pontos a ser movida para uma altura parametrizável, que corresponde à altura da laje em relação ao ponto selecionado anteriormente. Os pontos da matriz correspondem às interseções dos eixos estruturais, onde serão posicionados os pilares. O exemplo de matriz inicial adotada foi de uma célula de três mil milímetros por três mil milímetros, distribuindo uma série de cinco pontos no eixo X por três pontos no eixo Y, o que gerou uma área de exatamente setenta e dois metros quadrados, com doze metros de comprimento por seis metros de largura. (Fig. 122)

Figura 121 – Primeiro passo da modelagem algorítmica: escolha de um ponto de inserção.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Figura 122 – Segundo passo da modelagem algorítmica: criação de uma matriz de pontos.

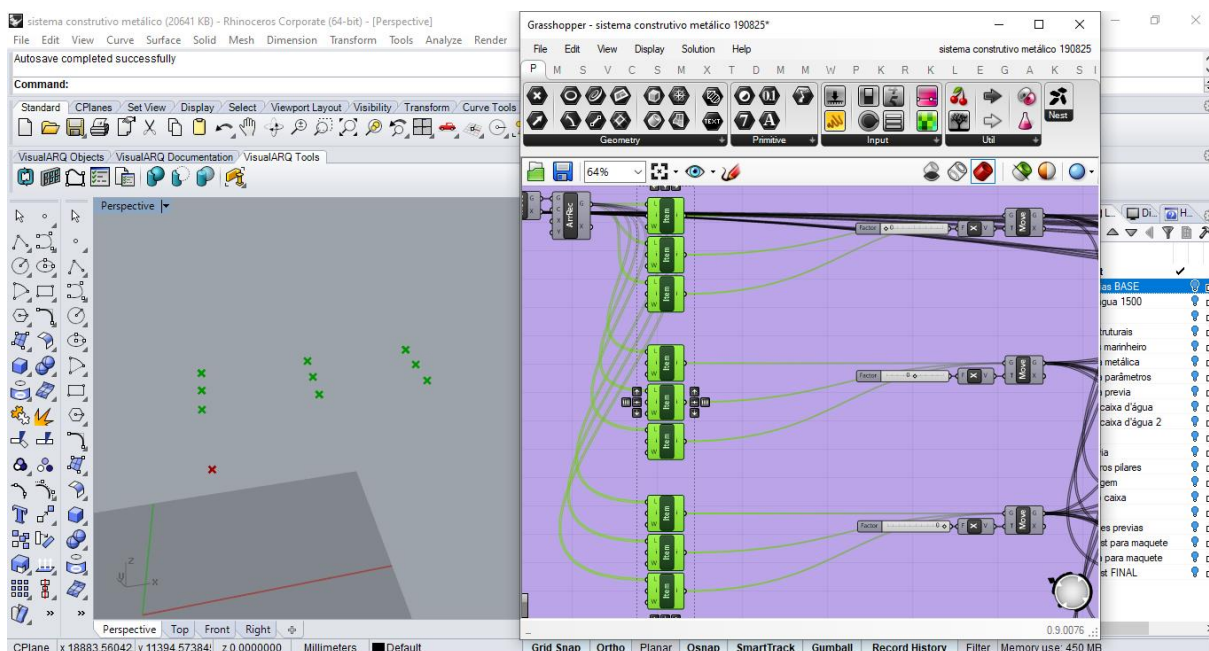


2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

A partir da matriz gerada, houve uma escolha de pontos, reduzindo assim a quantidade de eixos estruturais, para apenas três eixos no sentido X e mantendo os três eixos no sentido Y. Para efeitos da demonstração desta tese, os três eixos no

sentido X serão agrupados proposadamente, para que possam ser movimentados em conjunto. Tal possibilidade de movimentação dos eixos estruturais X resultará, adiante na definição, na transformação por recursividade⁵¹ dos formatos dos elementos estruturais, de acordo com as distâncias entre os vãos, tanto para os pilares quanto para as vigas. Em outras palavras, possibilitará a alteração da área total da casa e a distribuição dos pilares conforme as supostas necessidades do projeto, fazendo com que os elementos estruturais sejam transformados automaticamente, evitando, assim, o redesenho do projeto. (Fig. 123)

Figura 123 – Escolha de pontos a partir da matriz anterior.

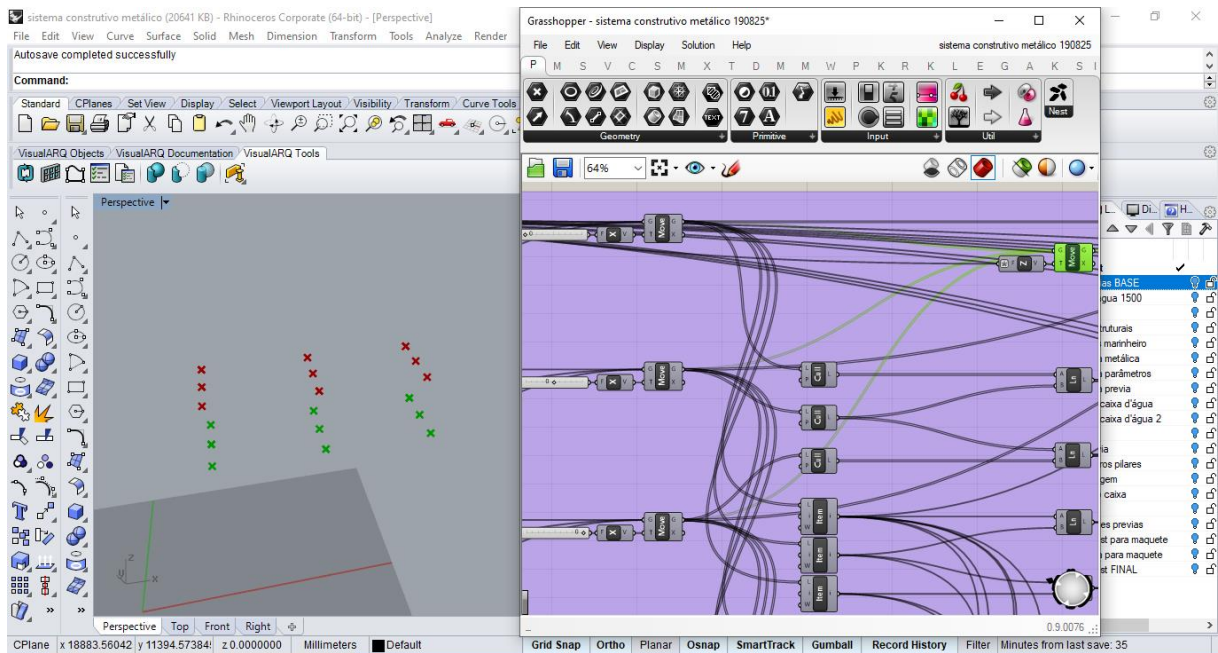


2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Os 9 pontos escolhidos foram, então, duplicados no sentido oposto do movimento da matriz para criar a altura dos pilares, funcionando em conjunto com a altura da laje. Para tanto, basta utilizar o mesmo parâmetro, mas, neste caso, invertendo o seu valor no componente do vetor Z do movimento. (Fig. 124).

⁵¹ Conforme definição de Jane Burry e Mark Burry (2010; p. 264), entendida, de maneira geral, como uma ação que se repete encadeadamente em diferentes partes de um mesmo modelo.

Figura 124 – Movimentação dos pontos anteriores para base dos pilares.

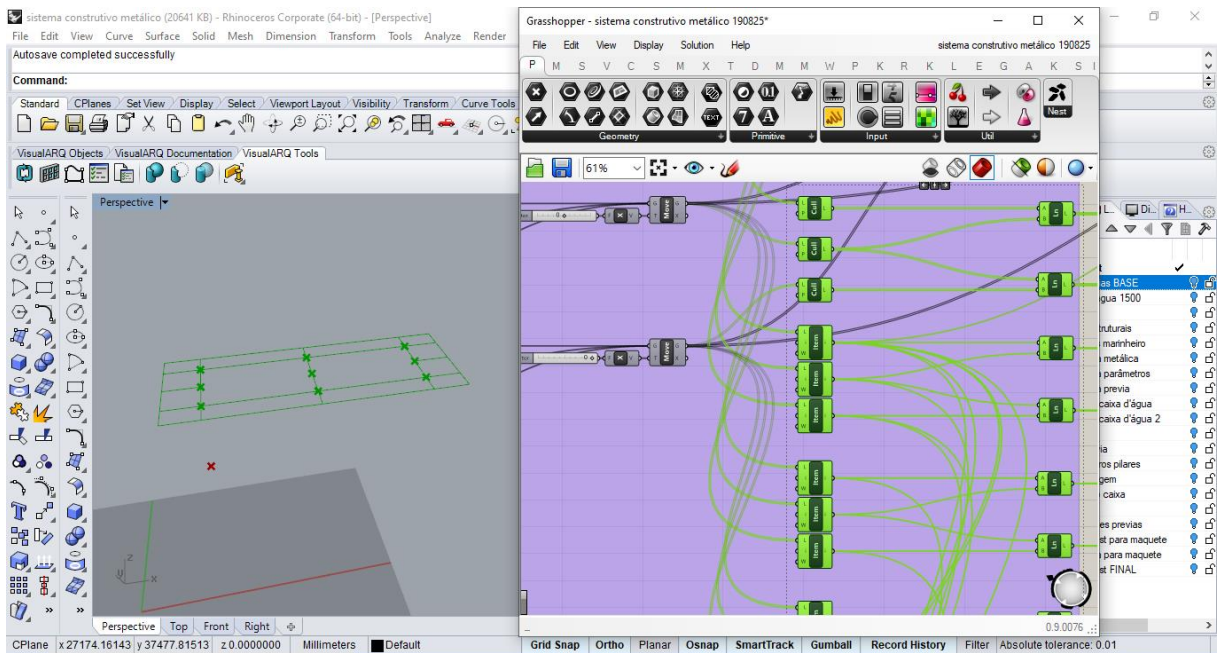


2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

A partir daí, houve uma escolha de pontos para modelar as linhas que darão origem, adiante no algoritmo, às vigas internas da estrutura. Outra escolha de pontos também foi realizada para modelar o retângulo perimetral da área interna da casa. A partir desse retângulo foi possível duplicá-lo e deslocá-lo, de forma parametrizável, para fora, conforme o beiral projetado de dois metros. Isso possibilitou a redução da largura do beiral e, conseqüentemente, a redução da área total da laje de cobertura. A área máxima do retângulo é a mesma área total de cento e sessenta metros quadrados, mas pôde ser parametricamente reduzida tanto pela variação da largura do beiral quanto pela variação das distâncias entre os eixos estruturais. (Fig. 125)

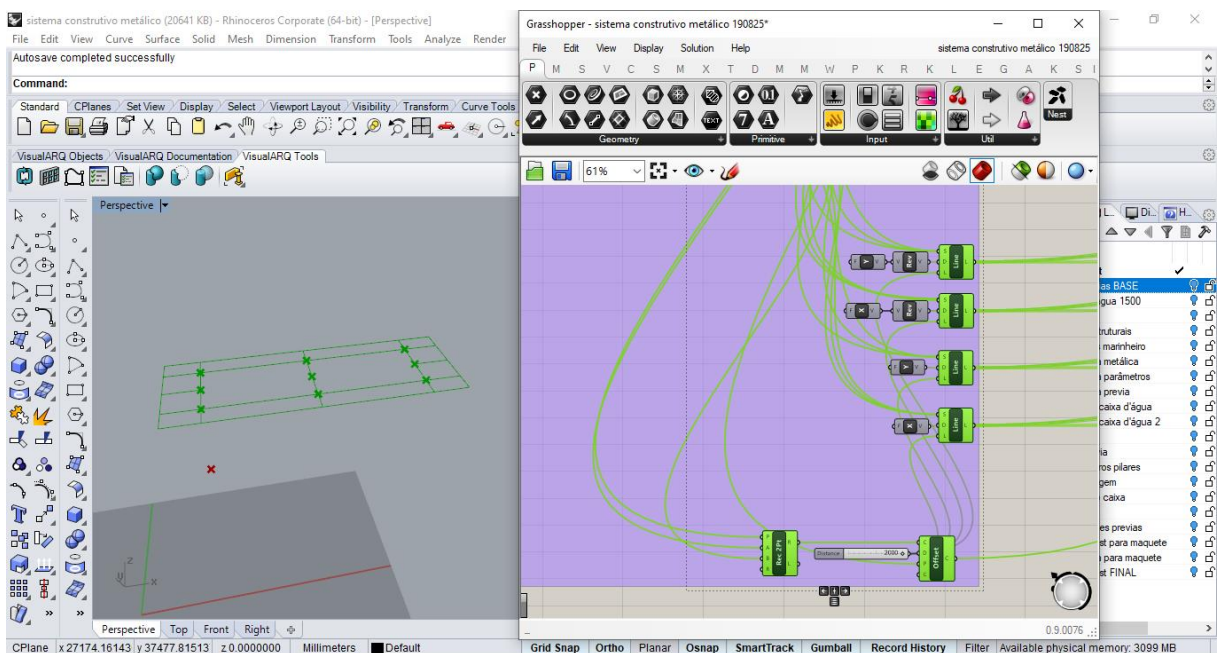
A partir do parâmetro do deslocamento do beiral foi possível criar as linhas que darão origem às vigas em balanço que o apoiam. Tais linhas foram criadas a partir de vetores direcionais que dependem da orientação do beiral e que estão vinculados ao mesmo parâmetro do seu deslocamento. Portanto, o comprimento das vigas em balanço será determinado pela largura do beiral. (Fig. 126)

Figura 125 – Conformação das linhas que gerarão as vigas posteriormente no algoritmo.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Figura 126 – Conformação das linhas que gerarão as vigas em balanço.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

A princípio, tais operações foram semelhantes às de uma modelagem tridimensional ponto a ponto. A diferença no *Grasshopper*® é a manutenção do parâmetro em aberto, possibilitando sua variação de acordo com as supostas necessidades do projeto. Ao invés de clicar na área de trabalho 3D, criaram-se

componentes geradores das formas no espaço de trabalho do algoritmo. Esta primeira etapa da definição é considerada como uma modelagem algorítmica básica, quando são traçadas as geometrias – pontos, linhas, planos – que estruturarão todo o restante do sistema generativo.

5.1.3.2 – Segunda etapa da definição: introdução do cálculo estrutural na modelagem algorítmica

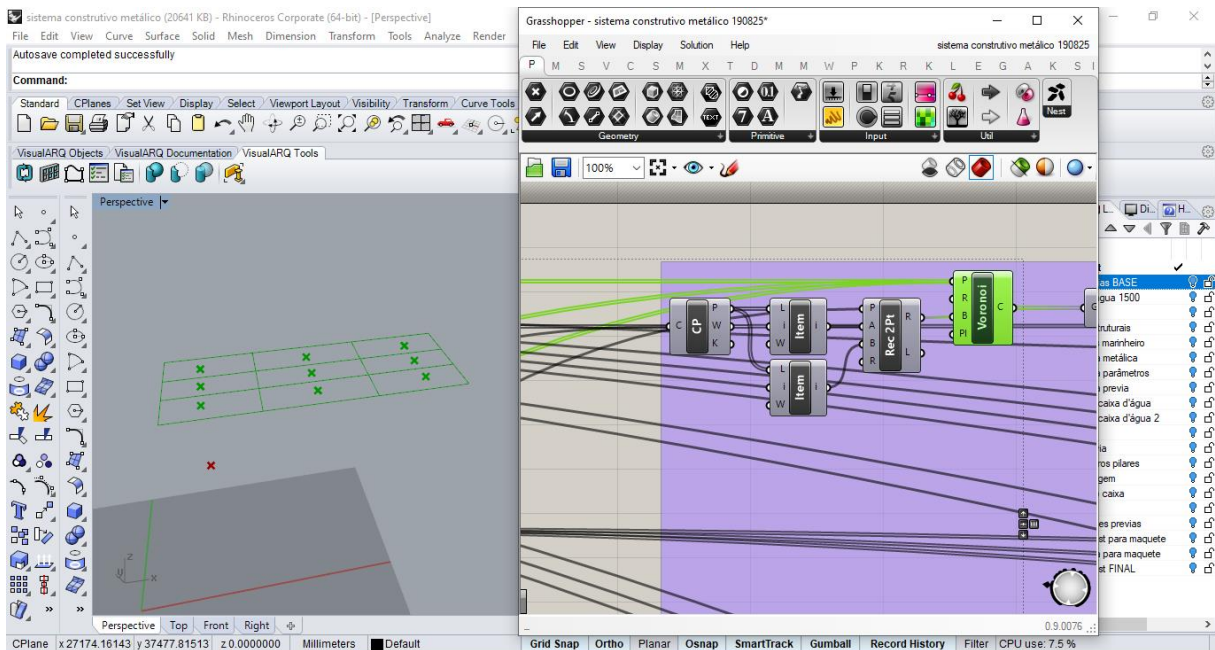
Todos os pontos e linhas modelados na etapa anterior serão utilizados como parâmetros para a geração das formas nas etapas subsequentes. A partir desta segunda etapa, o algoritmo foi complementado com um pré-dimensionamento estrutural de pilares e vigas, que é capaz de definir os formatos de todas as peças. A ideia é que o desenho final seja gerado automaticamente pelo cálculo estrutural programado no algoritmo. Todas as medidas serão calculadas por meio da variação dos vãos entre os eixos estruturais e do deslocamento do beiral, definindo um processo *CAE*.

Iniciou-se o cálculo pela laje, uma vez que ela lança um peso sobre as vigas para distribuição entre os pilares, até alcançar a fundação que não será detalhada neste experimento, pois compreende uma fase de construção com demandas específicas que não cabem ser descritas aqui. Entende-se, portanto, que a estrutura será montada sobre uma fundação ideal para a condição do terreno de cada projeto, a ser executada independentemente deste roteiro.

Cada pilar recebe uma carga a partir de sua área de influência correspondente ao trecho específico da laje. A divisão da área total da laje em áreas de influência menores, ao redor de cada pilar, foi solucionada, na definição, por meio do componente Voronoi⁵². Neste momento na definição, há os pontos de interseção dos eixos estruturais e um retângulo com o tamanho total da laje de cobertura. O Voronoi requer exatamente tais dados de entrada: um conjunto de pontos e uma linha de limite. Para tanto, é necessário, primeiramente, converter o deslocamento do beiral em um retângulo construído a partir de seus cantos e, depois, escolher os mesmos nove pontos de interseção dos eixos estruturais já descritos. Daí o componente resultará nas áreas de cada célula, exatamente as áreas de influência de cada pilar. (Fig. 127)

⁵² Definição matemática de Voronoi, conforme Pottmann [et al.] (2007; p. 615-620) e Burry e Burry (2010; p. 77-81), em termos gerais, refere-se a uma configuração celular onde diferentes regiões vizinhas são acumuladas em um único conjunto.

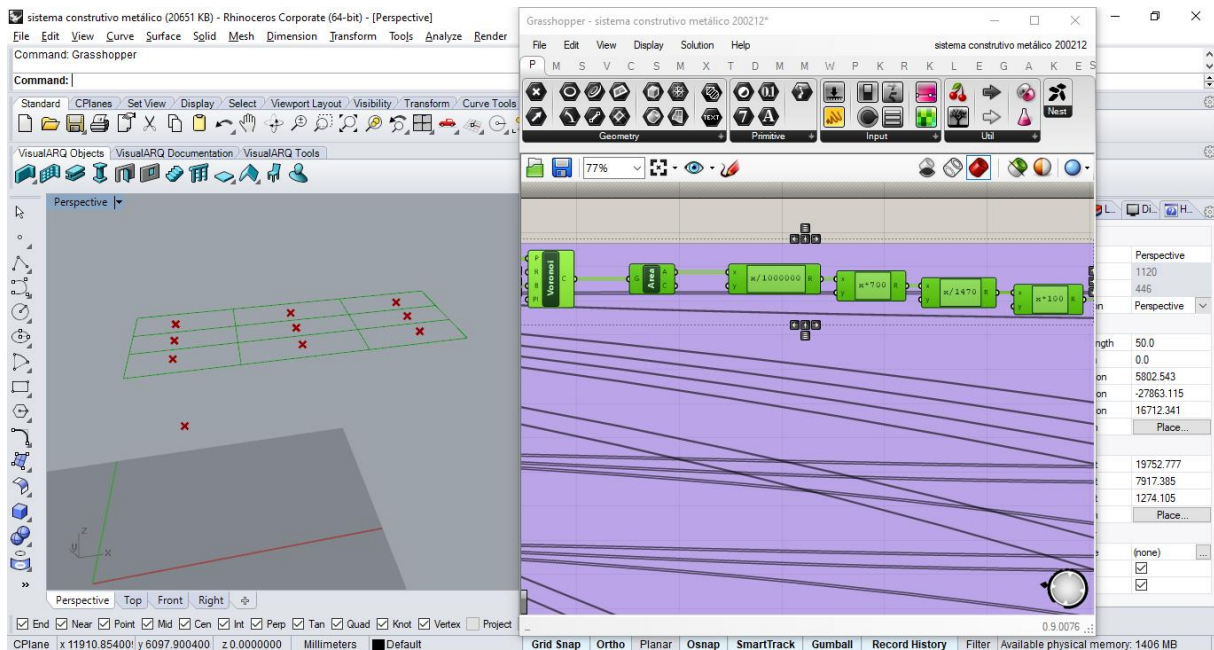
Figura 127 – Conformação do Voronoi.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

A partir de tais áreas foi possível realizar o cálculo da seção dos pilares metálicos, de acordo com a fórmula de pré-dimensionamento empírico $S=P/\sigma$. Rebello (2007, p. 90) informa que o peso (P) a ser considerado é de 700 kgf/m², multiplicado pela área de influência de cada pilar, resultando em uma sequência de valores em kgf. Tais valores foram, então, divididos pela tensão admissível (σ) de 1.470 kgf/cm², conforme Dias (1997, p. 278), resultando na área abstrata da seção (S) de cada pilar em centímetros quadrados. Observa-se que existem duas operações de conversão de unidades de medida, considerando que a área de trabalho do *Rhinoceros*® foi configurada para milímetros. A primeira delas converte milímetros quadrados para metros quadrados, uma divisão por 1.000.000 relativa à área de influência de cada pilar, e a segunda converte centímetros quadrados para milímetros quadrados, uma multiplicação por 100 relativa à cada área de seção obtida. (Fig. 128)

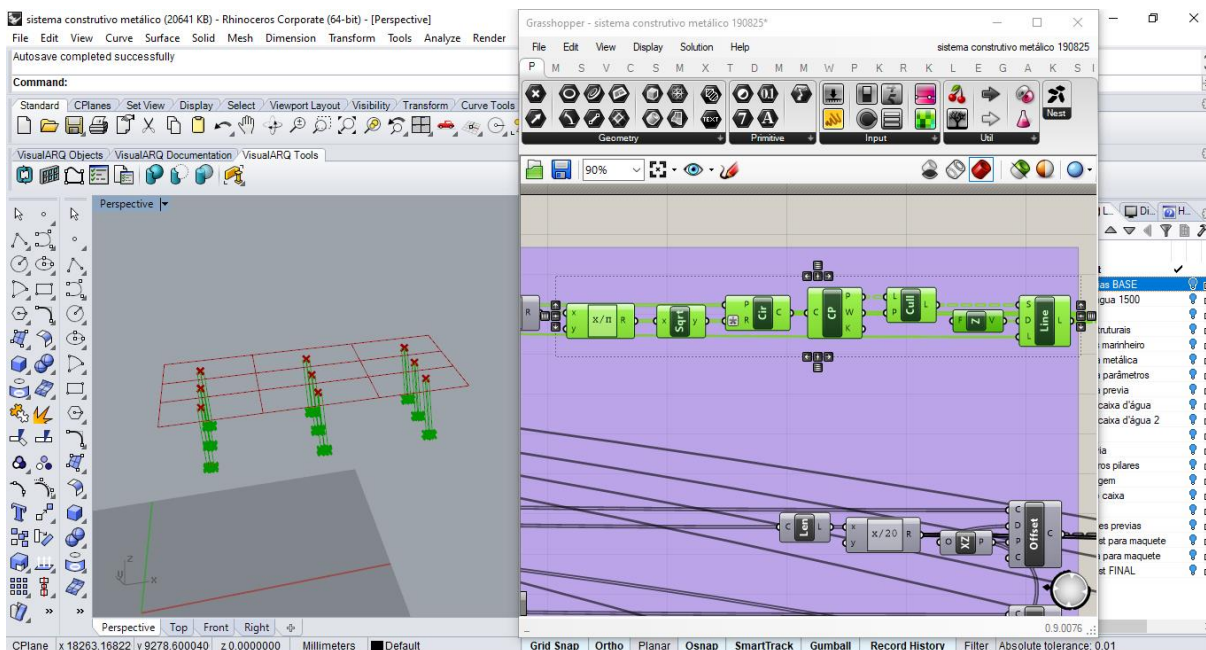
Figura 128 – Cálculo básico para seção dos pilares.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Para efeitos da geração dos formatos dos pilares, as suas respectivas seções foram convertidas, a princípio, em círculos. Para tanto, as áreas abstratas obtidas anteriormente foram divididas por π e, depois de calculadas suas respectivas raízes quadradas, resultaram no raio de cada seção circular. Ressalta-se que foi utilizado um fator de correção visual de todas as seções circulares, uma multiplicação por dez de todos os seus respectivos raios, para ajustar a proporção dos pilares em relação às vigas, uma vez que o cálculo descrito no parágrafo anterior resultou em pilares muito esbeltos. A utilização de tal fator não influenciou na posterior fabricação das peças, pois não alterou consideravelmente nem a quantidade linear de corte, nem a quantidade de chapas utilizadas, atuando apenas como um ajuste estético – além de uma garantia estrutural. Após a escolha da seção circular correta, cada uma das nove seções foi interpretada em um formato cruzado, a partir de linhas cujas origens encontram-se nos quadrantes de cada círculo. A altura dessas linhas, na verdade a altura das peças que conformarão os pilares, foi parametrizada pela altura da laje, conforme descrito anteriormente. (Fig. 129)

Figura 129 – Criação das linhas dos pilares de acordo com fator de correção.

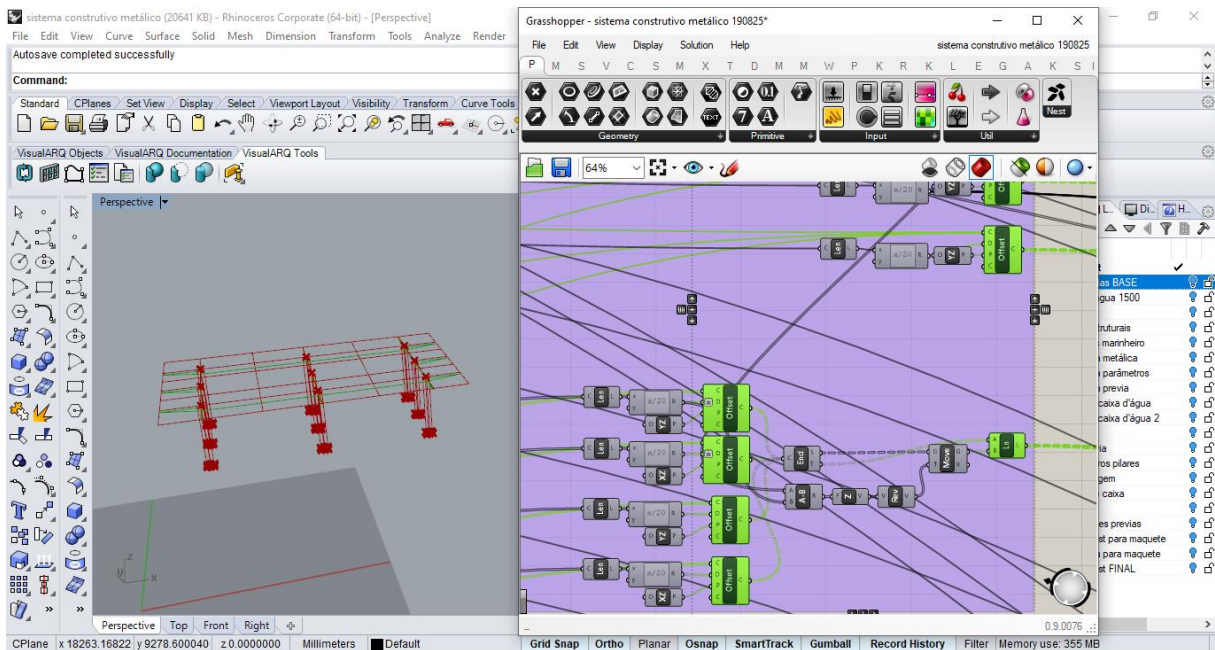


2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Uma vez calculados os pilares, partiu-se para o pré-dimensionamento das alturas das vigas internas, usando a fórmula $L/20$, ou 5% do vão (L) para vigas bi apoiadas, também conforme Rebello (2007, p. 77). Daí, por meio da variação dos vãos entre os eixos estruturais, as alturas das vigas internas transformam-se automaticamente. Por último, ocorreu o pré-dimensionamento das vigas em balanço usando a mesma fórmula, mas considerando como parâmetro a largura do beiral. Introduziu-se uma variável que aumenta a altura de uma das extremidades das vigas em balanço, conforme a altura das vigas internas, criando um efeito visual de afinamento em direção ao perímetro da laje. (Fig. 130)

A inserção do cálculo estrutural no projeto parametrizado demonstra a abertura que tal técnica possibilita para que as operações da engenharia possam interagir com as da arquitetura. Deve-se considerar que o cálculo aqui apresentado foi um pré-dimensionamento estrutural básico que ainda pode ser desenvolvido para se tornar cada vez mais preciso. A presença do cálculo garante que os formatos das peças, a serem modelados na próxima etapa da definição, serão adequados para a construção. Ressalta-se, ainda, a semelhança visual entre o modelo realizado nesta etapa e a modelagem ponto a ponto feita para o sistema construtivo metálico, em etapa anterior, composta apenas por linhas que permitiram a visualização prévia dos elementos estruturais, agora modelados algoritmicamente.

Figura 130 – Criação das linhas das vigas de acordo com cálculo empírico.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

5.1.3.3 – Terceira etapa da definição: modelagem dos componentes da estrutura metálica

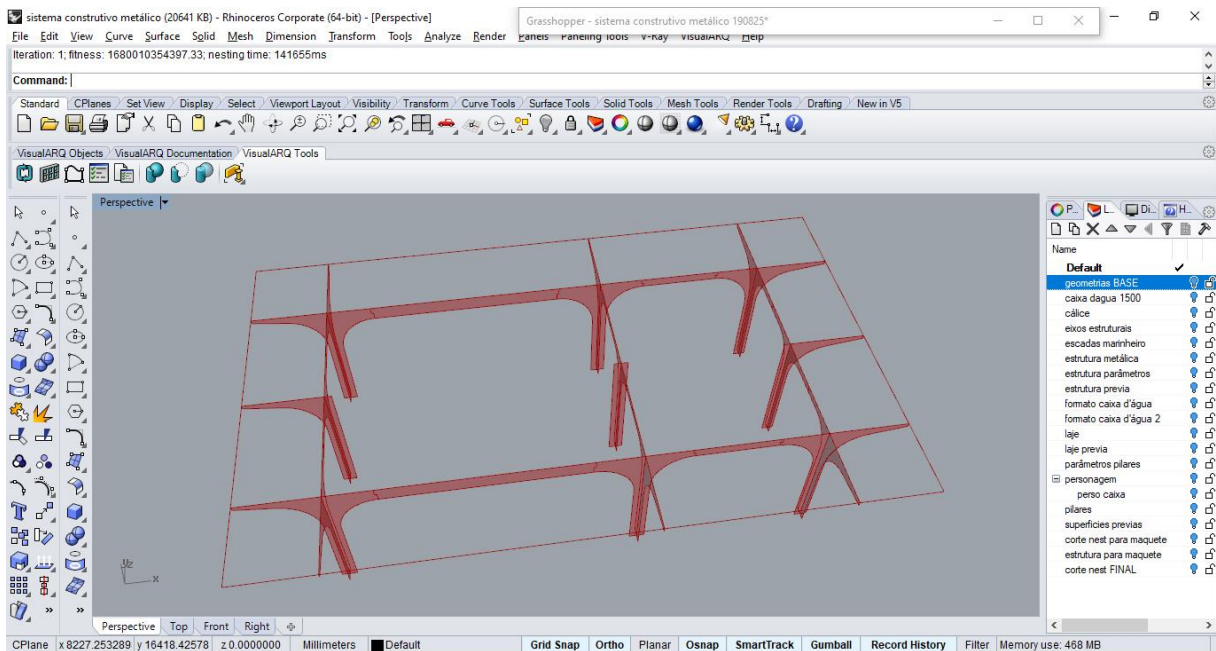
A terceira etapa é constituída por operações que se repetem com a finalidade de modelar as superfícies de todas as peças do sistema pré-fabricado metálico concebido aqui. A partir do cálculo completo descrito anteriormente, que gerou uma organização de linhas e pontos, iniciou-se a modelagem de superfícies e linhas de corte tendo como base essas geometrias.

Nos termos da definição, serão realizadas quatro operações repetitivas para modelagem de superfícies que serão cortadas por linhas com formato dos arcos, vigas e pilares. Tais superfícies modeladas estarão parametricamente relacionadas ao cálculo e se ajustarão automaticamente a depender de qualquer alteração dos parâmetros da geometria base. Definiu-se, nesta etapa, um processo *CAD* de desenho de cada uma das peças, incluindo decisões sobre os tipos de encaixe, curvatura dos arcos e possíveis métodos de montagem das diversas peças entre si, uma vez que isso influenciará a última etapa orientada para fabricação.

O referido processo *CAD* iniciou-se com a compreensão dos tipos de peças que compõem a estrutura completa. De uma maneira geral, verificou-se a existência de pilares e vigas. Os pilares desenhados em cruz e, de acordo com uma visão do

processo construtivo, seriam montados por parafusos, resultando em peças menores e mais leves para encaixe umas nas outras. Cada pilar conterá quatro peças e, dependendo de sua localização na planta, poderá ficar ladeado pelo beiral ou se configurar como um pilar central, que supostamente daria suporte para a caixa d'água (Fig. 131). Então, mapearam-se as possíveis peças dos pilares em quatro opções: peça com mão francesa em arco para beiral, peça com mão francesa em arco para encaixe de viga, peça para arco e peça sem mão francesa para aqueles pilares internos que não receberão vigas. O arco foi parametrizado de acordo com o melhor chanfro resultante da distância entre pilares que origina o vão da viga. A escolha do arco, além de uma dimensão estética, devido à conexão viga e pilar, contou com uma dimensão estrutural para compensar a esbelteza dada às peças que configuram os balanços e criar uma peça de conexão mais resistente para o recebimento das vigas a serem parafusadas.

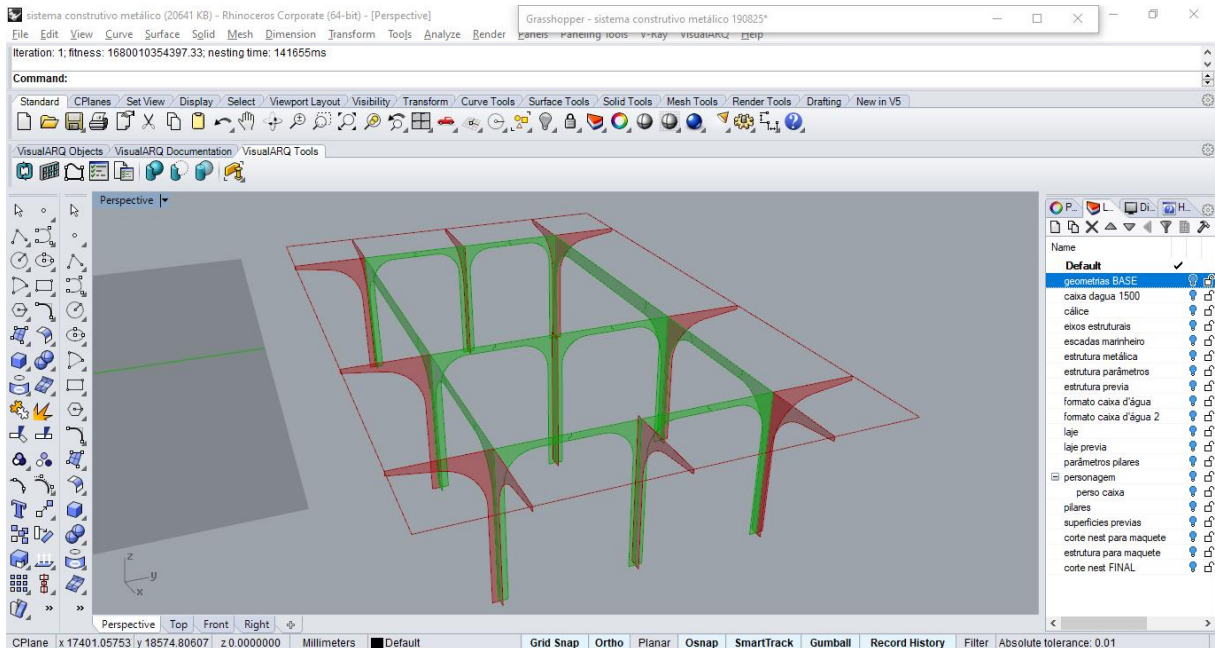
Figura 131 – Esquema das peças estruturais modeladas algoritmicamente.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Com relação às vigas, partiu-se de um princípio relativo ao vão entre os pilares. Se o vão for de até três metros, então não há vigas e sim uma conformação em arco, onde duas peças de pilar se conectarão diretamente. Para vãos maiores que três metros, vigas independentes foram modeladas. (Fig. 132)

Figura 132 – Esquema das peças com vigas e arcos.

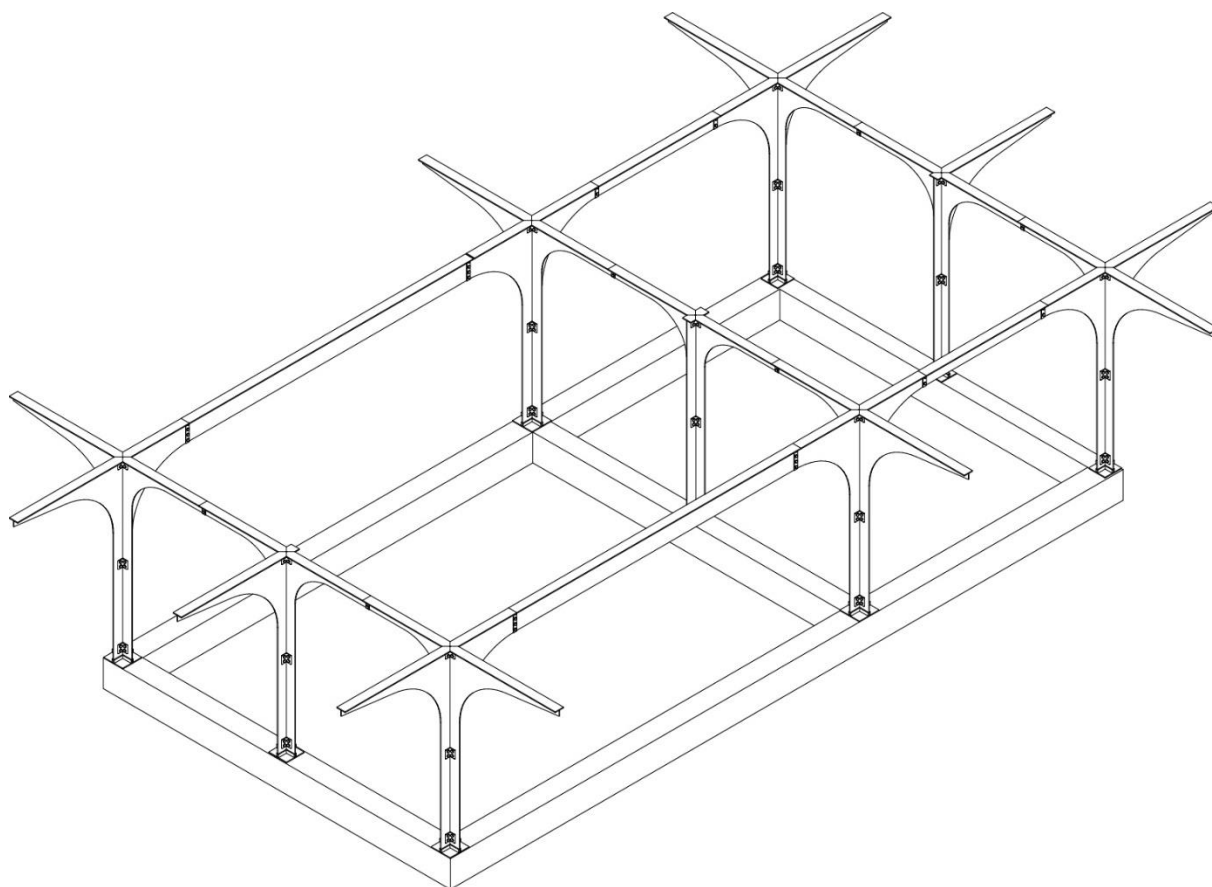


2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Os encaixes foram planejados para atuar com peças parafusadas entre si (Figs. 133 e 134). Embora o modelo final ter apresentado uma solução preliminar para os encaixes parafusados, tanto para as peças dos pilares quanto para os encaixes com vigas, o detalhamento dessas peças parafusadas não foi contemplado no algoritmo, considerando-se que essa parte da pesquisa não se constituiu em objetivo a ser alcançado aqui. Esse tipo de encaixe por parafuso foi pensado para facilitar a montagem da casa pelos próprios habitantes, seguindo uma metodologia comum, por exemplo, à *WikiHouse*. Uma vez as peças cortadas e entregues no canteiro da obra, seria possível a montagem artesanal por poucas pessoas.

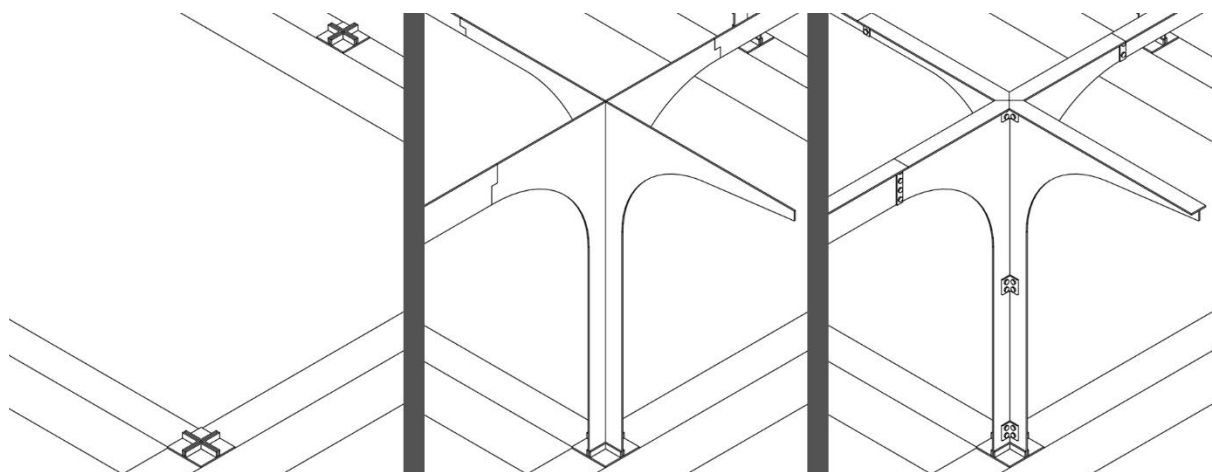
Tendo em vista tal organização de peças, começou-se o processo de modelagem algorítmica de cada uma delas. Todo esse processo ocorreu por meio da seleção dos parâmetros geométricos modelados anteriormente, ao se selecionar uma série de pontos ou linhas para gerar novas linhas, extrusões de linhas, chanfros entre linhas e cortes de superfícies a partir dessas linhas, até se alcançar os formatos finais de cada peça. Esse processo de seleção originou uma sequência de operações repetitivas no algoritmo para modelagem das peças.

Figura 133 – Esquema geral de montagem das peças estruturais sobre modelo preliminar de fundação.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Figura 134 – Detalhe de esquema de montagem por encaixes parafusados entre as peças da estrutura metálica.

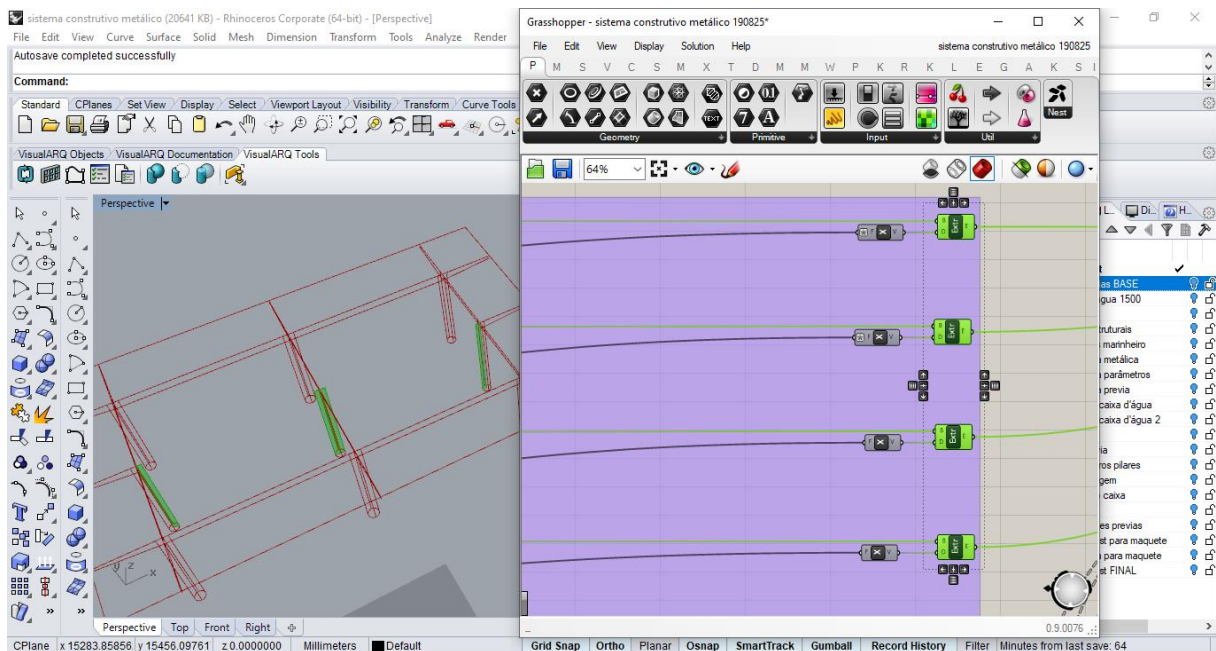


2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Uma primeira sequência de operações repetitivas ocorreu para modelagem daquelas peças dos pilares que não recebem vigas, simples extrusões das linhas

internas selecionadas na direção do raio de cada seção circular, utilizando tal parâmetro, resultando em quatro peças. (Fig. 135)

Figura 135 – Modelagem das primeiras superfícies dos pilares.



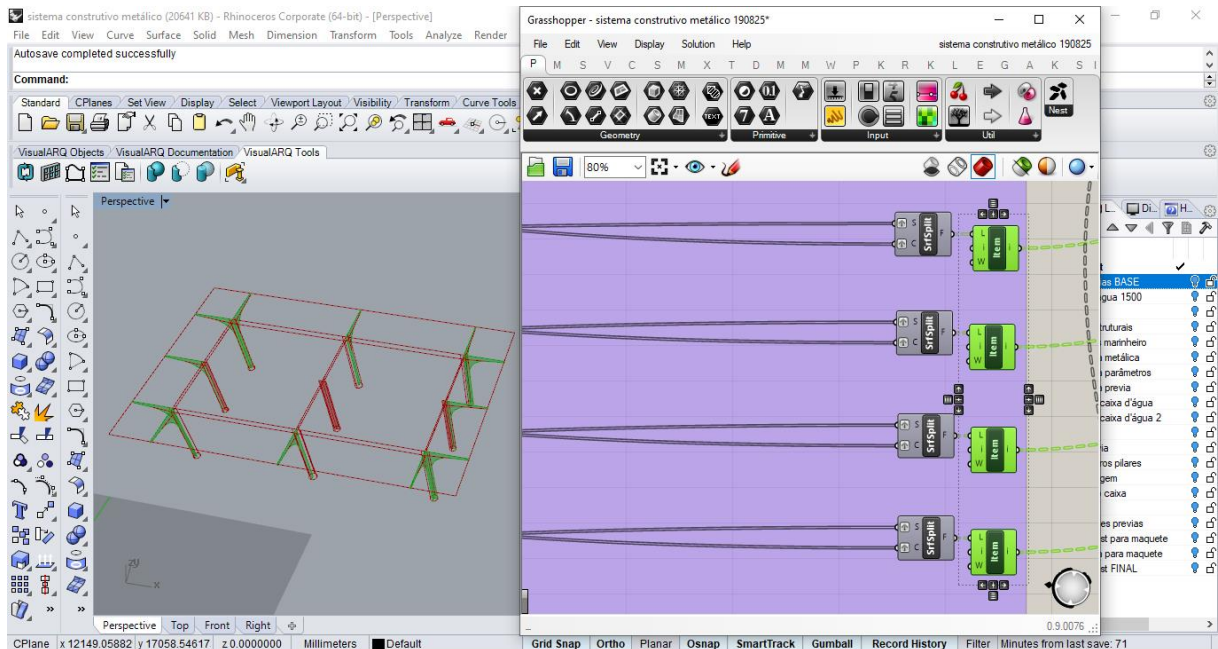
2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

A segunda sequência de operações repetitivas ocorreu para modelagem daquelas peças dos pilares que apoiam os beirais por meio de mão francesa em arco. Para tanto, selecionaram-se as linhas corretas, criando depois um ponto de interseção no cruzamento delas, para que daí fosse possível selecionar uma ordem de pontos para construção de uma polilinha contínua. Tal polilinha foi então chanfrada em arco resultante da melhor tangente entre as linhas que compõem o ângulo da curvatura. A partir daí, foram criados planos para que pudessem ser cortados pela polilinha já chanfrada, resultando, assim, nos formatos finais das peças, doze ao todo. (Fig. 136)

A terceira sequência de operações repetitivas ocorreu para modelagem daquelas peças com mão francesa em arco e encaixe para vigas. A operação começou de maneira semelhante à modelagem das peças anteriores, selecionando as linhas corretas para se criar uma interseção, construir uma polilinha contínua e finalmente chanfrá-la. No entanto, como são peças que receberão vigas, o corte final será diferente, separando a viga na seção do encaixe. Então, construiu-se uma

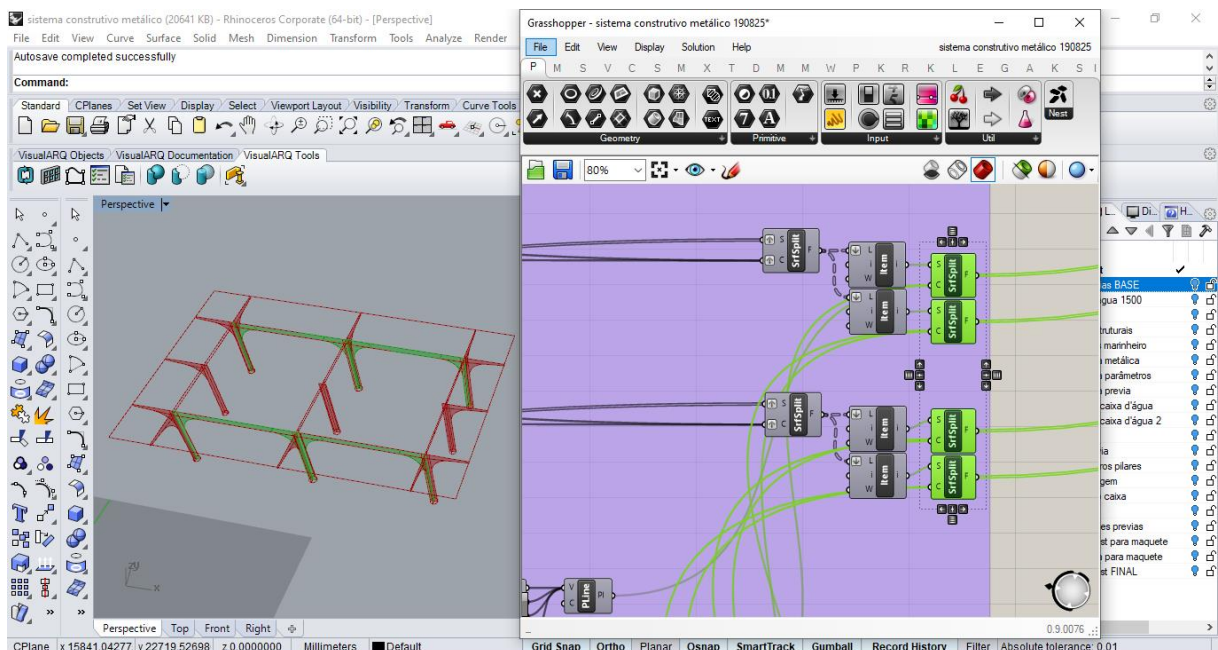
superfície que abarcou todo o plano desses vários elementos e modelou-se também as polilinhas para o esquema de encaixe. (Fig. 137)

Figura 136 – Modelagem dos pilares com vigas em balanço.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Figura 137 – Modelagem dos pilares que recebem vigas.

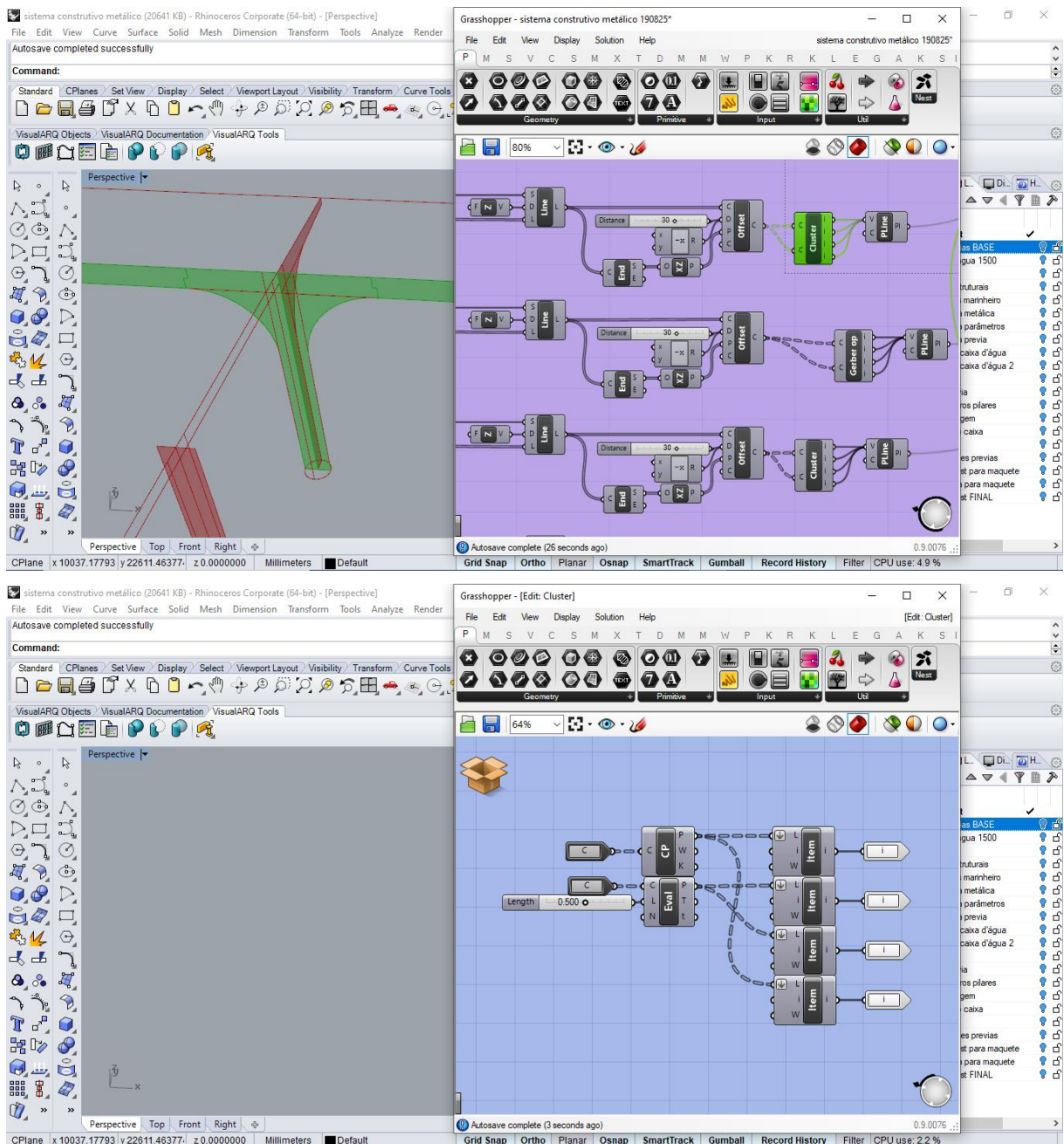


2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

A etapa de modelagem dos encaixes dependeu de um algoritmo próprio que foi agrupado em um componente *cluster* dentro do *Grasshopper*®. Esse *cluster* foi criado

durante a montagem da definição para facilitar o processo repetitivo e até reduzir o tamanho do algoritmo final, tornando-o mais simplificado. Basicamente, é um componente que seleciona a ordem correta dos pontos para construção da polilinha que definirá o encaixe. Por fim, tais polilinhas foram posicionadas no ponto de encontro entre a extremidade do arco do pilar e o início da linha reta que constituirá a viga. Após a terceira sequência de operações repetitivas, doze peças foram desenhadas. (Fig. 138)

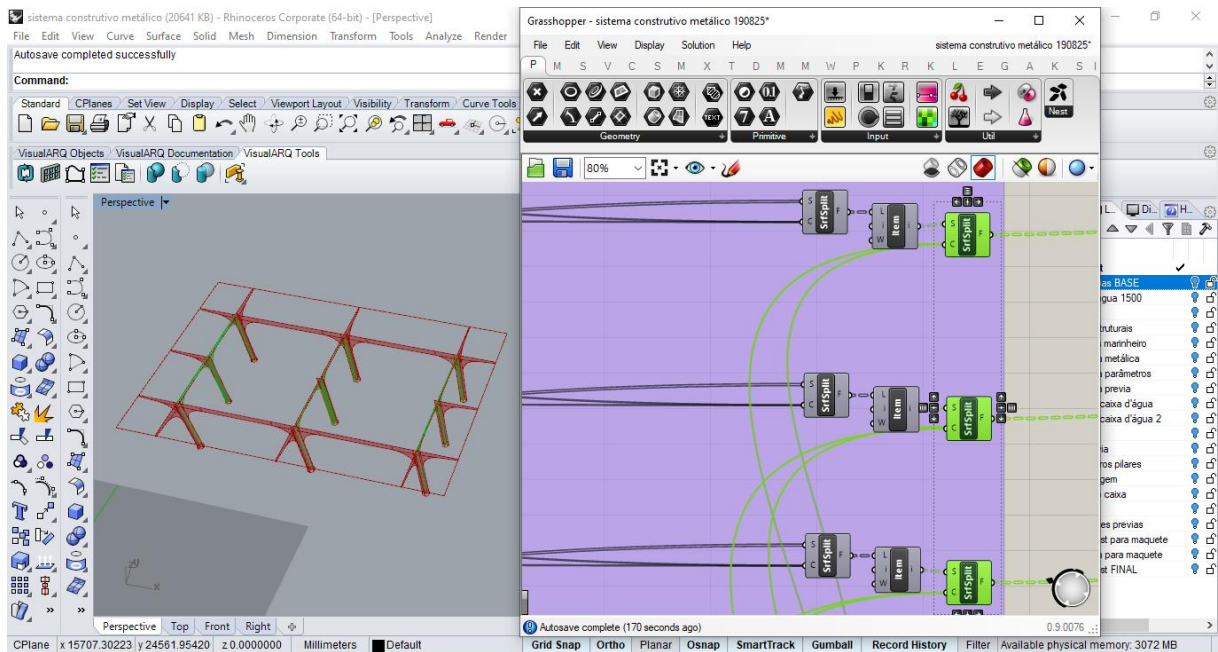
Figura 138 – Modelagem dos encaixes, a partir de *cluster* dentro do *Grasshopper*®.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

A quarta sequência de operações repetitivas ocorreu para modelagem daquelas peças para arco que compõem os vãos com até três metros. Seguiu-se a mesma operação anterior para as peças que recebem as vigas, mas com um único encaixe no centro do arco, ligando um pilar ao outro, sem vigas. Ao final, gerou-se mais doze peças. (Fig. 139)

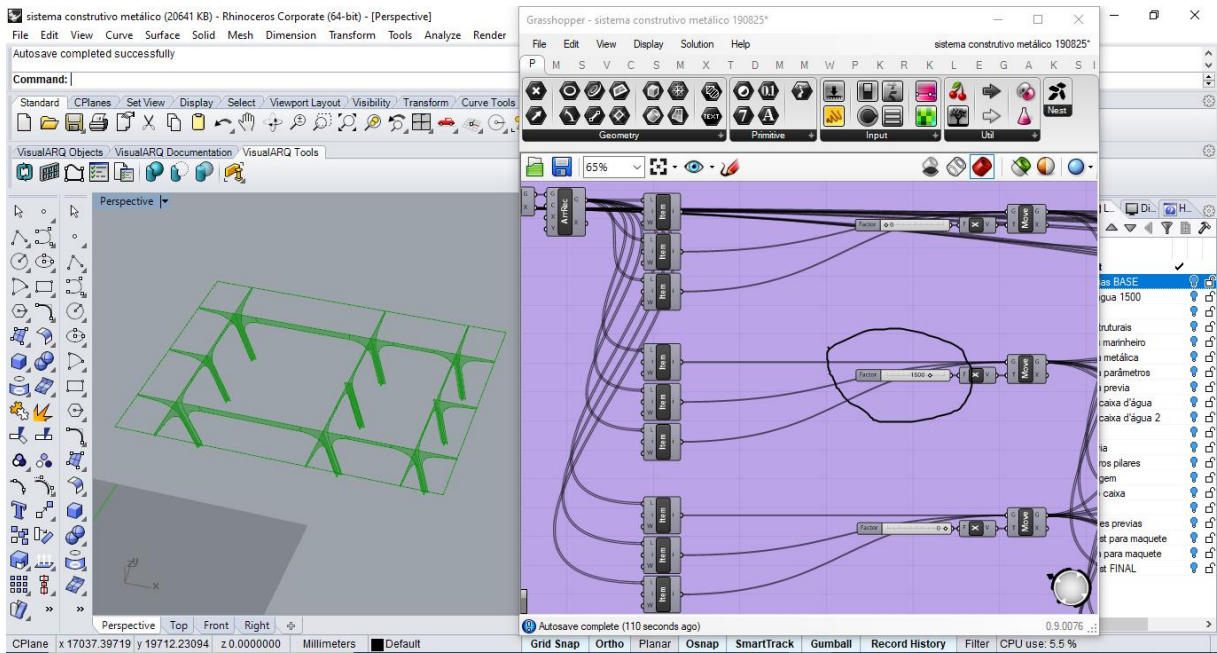
Figura 139 – Modelagem dos pilares em arco.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Todas as peças assim geradas, conformando um arranjo de quarenta peças, configuraram uma estrutura capaz de apoiar uma laje de cobertura. A modelagem algorítmica desta etapa necessitou de maior tempo de programação, visto que há uma maior quantidade de dados a serem processados. Porém, resultou em um sistema generativo que não necessita de remodelagem ponto a ponto *a posteriori*. Uma vez que as geometrias foram calculadas, poderão reagir aos dados que forem introduzidos no algoritmo, tanto para a altura e seção dos pilares, quanto para a altura das vigas e arcos. Todas as partes do modelo algorítmico mantêm uma relação de interdependência entre si, a partir desse ponto. Para demonstrar essa relação o algoritmo foi planejado com uma seleção de eixos estruturais que possibilita a transformação recursiva das seções de pilares e vigas por meio da variação das distâncias entre os eixos (Fig. 140).

Figura 140 – Transformação recursiva de todas as seções de pilares e vigas a partir da alteração dos parâmetros de distância entre os eixos estruturais.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Acredita-se que as operações de modelagem algorítmica realizadas nesta terceira etapa poderiam ser reproduzidas inteiramente pela modelagem ponto a ponto, que já foi um resultado obtido anteriormente na pesquisa. No entanto, a modelagem ponto a ponto não possibilitaria parametrizar as geometrias por meio do cálculo de pré-dimensionamento, transformando-as automaticamente pela inserção de dados numéricos. Além disso, o algoritmo possibilitou que cada peça calculada e desenhada pudesse ser processada para corte CNC, conforme os processos a serem descritos na próxima etapa.

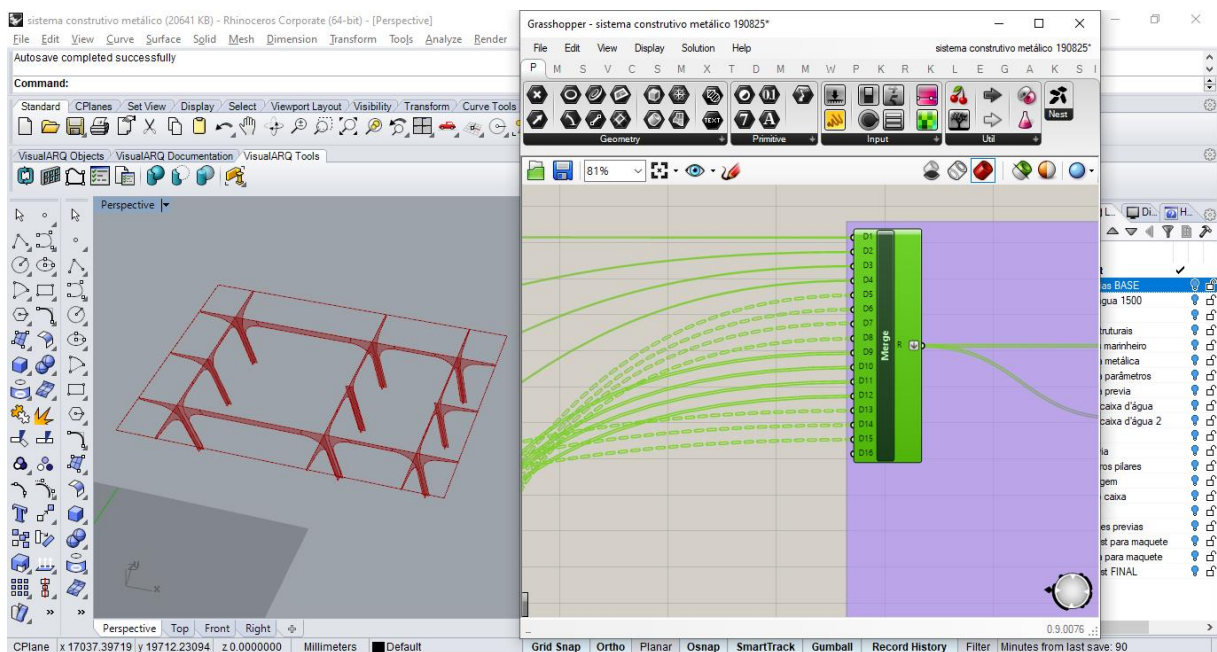
5.1.3.4 – Quarta etapa da definição: processamento para fabricação digital

A quarta e última etapa da definição *Grasshopper*® determinou o processo CAM do roteiro, com a principal finalidade de automatizar o processamento de todas as peças para a fabricação digital. O primeiro passo foi organizar a entrada de dados, ou seja, a sequência das peças, para que elas mantivessem a mesma ordem durante todo o processo. (Fig. 141).

A partir daí ocorreu a quantificação das quarenta peças desenhadas. Determinou-se, a partir das superfícies geradas na etapa anterior, a área de aço a ser

utilizado na estrutura e, conseqüentemente, a possibilidade de medição de seu respectivo peso. Para a hipotética construção da casa compartilhada, especificou-se a utilização de chapas de meia polegada, que pesam aproximadamente 98,25 kg/m² de acordo com catálogo técnico da GRAVIA. O total gerado foi de aproximadamente quatro toneladas de aço apenas para as quarenta peças, com cada peça pesando em torno de cem quilos. (Fig. 142)

Figura 141 – Ordenamento das peças modeladas algoritmicamente.



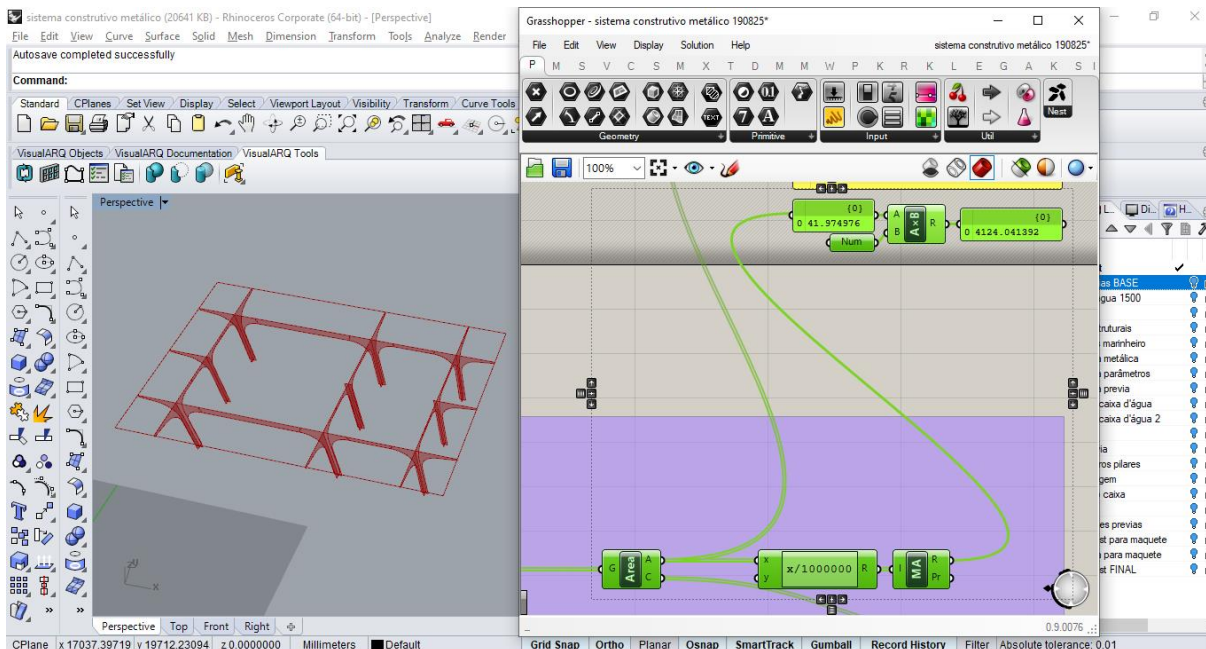
2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Depois, houve um processo de planificação das peças, por meio do componente *unroll*, conforme a sequência estabelecida no primeiro passo. Daí elas foram movimentadas no plano de maneira seriada para melhor visualização. (Fig. 143)

Depois, as peças passaram por um processo chamado *nesting*, feito por um *add-on* do *Grasshopper*® chamado *OpenNest*®, que automatizou a operação de encontrar a distribuição mais otimizada das peças em chapas a serem cortadas pela máquina CNC. Gabriele Landim [et al.] define *nesting* como “[...] o processo de posicionar partes de corte em placas planas para serem cortadas por máquinas de

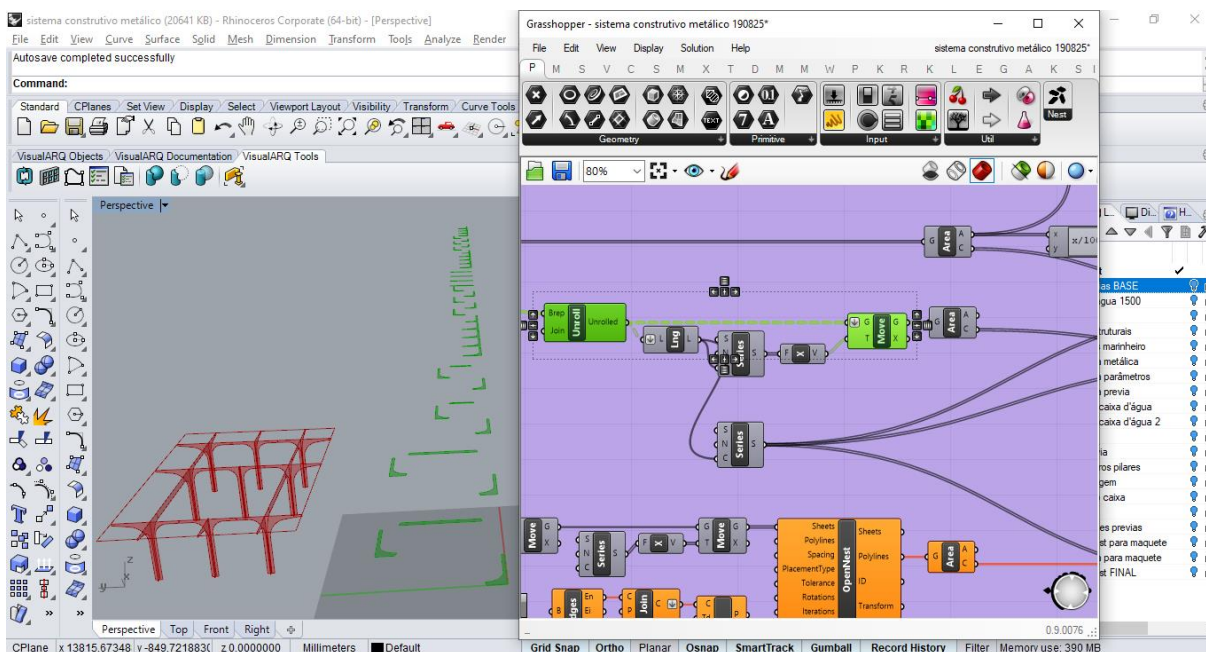
fabricação digital, tal como a máquina de fresagem CNC em sistemas CAD/CAM. ⁵³ (LANDIM [et al.], 2017, p. 341, tradução nossa).

Figura 142 – Cálculo do peso do material a ser utilizado.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Figura 143 – Planificação das peças estruturais.



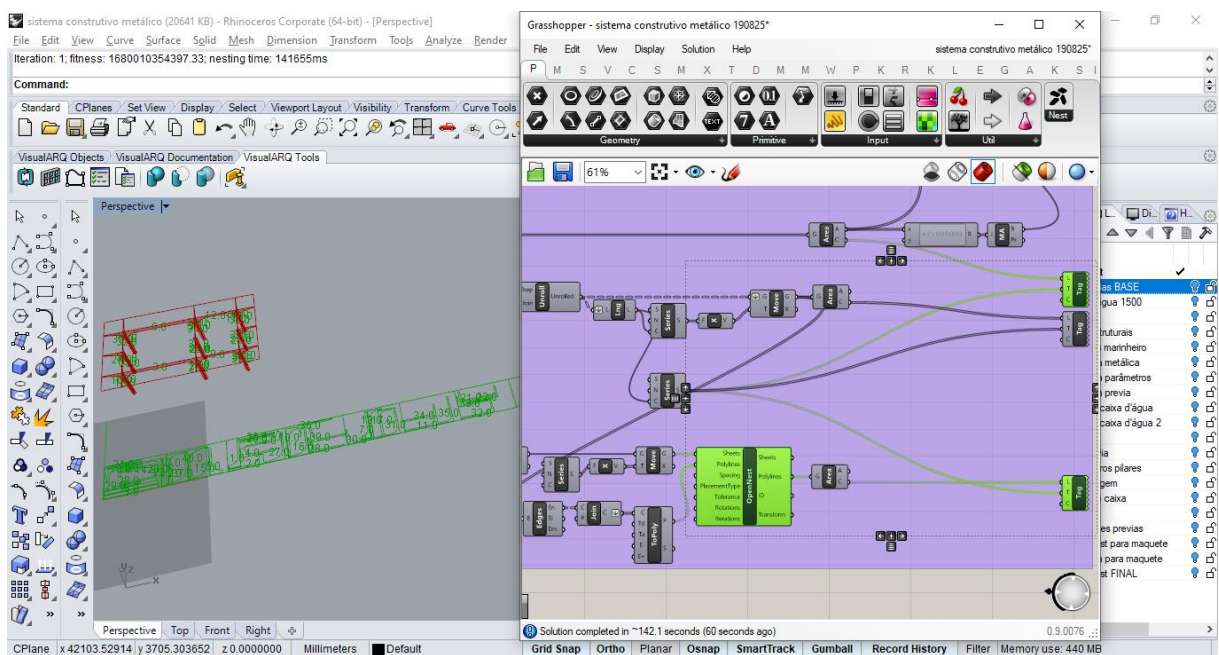
2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

⁵³ Original: “Nesting is known as the process of positioning cut parts on flat sheets to be cut in digital manufacturing machines, such as the CNC milling machine in CAD/CAM systems.” (LANDIM [et al.], 2017; p. 341).

Como as peças foram geradas a partir de superfícies, foi necessário convertê-las em polilinhas para que o componente do *nesting* pudesse reconhecer os seus contornos. Na verdade, os contornos são dados suficientes para que a máquina possa entender os comandos de corte. Uma vez gerado o *nesting*, tais polilinhas foram distribuídas em chapas de seis metros por quatro metros, que simularam as chapas de aço em tamanho real. A partir daí, puderam ser importadas para outros *softwares*, como *AutoCAD*® ou *Illustrator*®, cujos arquivos são reconhecidos pelas máquinas CNC.

Por último, as peças foram identificadas, criando, assim, um mapa de identificação para etiquetagem. Optou-se pela etiquetagem e não, por exemplo, à gravação direta nas peças pela máquina, tanto pelo efeito estético da peça inteira, sem marcas, quanto pela garantia de sua integridade física. Observa-se que o processo de identificação, nos termos da definição, só ocorrerá da maneira correta se o primeiro passo, de ordenamento das peças, for cumprido. Só foi possível criar o mapa de identificação, pois se manteve a mesma ordem desde as peças montadas entre si, possibilitando identificar os diversos elementos em uma planta baixa, até o processo de *nesting*, onde as peças foram reordenadas para que pudessem alcançar a melhor distribuição nas chapas. Só assim foi possível criar um mapa de montagem eficiente para a montagem da maquete palpável. (Fig. 144)

Figura 144 – Processo de *nesting* das peças estruturais para corte CNC.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

5.1.3.5 – Síntese do roteiro de produção digital da casa compartilhada

Em termos gerais, o método de roteirização do projeto arquitetônico está relacionado à técnica de programação computacional conhecida como *scripting*, ou seja, pode ser compreendido como o método de programar uma sequência de ações de projeto de maneira a integrá-las em um sistema generativo de formas e informações construtivas. No caso desta tese, tal integração ocorreu por meio do *software* de modelagem algorítmica *Grasshopper®*, conforme parâmetros de projeto apresentados anteriormente, especificamente, o cálculo estrutural, a representação arquitetônica e a organização para fabricação digital. No entanto, a integração das ações de projeto pode ocorrer em qualquer *software* que possibilite encadeá-las sequencialmente, onde a alteração de um determinado parâmetro modifique automaticamente os outros parâmetros associados.

Nesse sentido, apresenta-se um quadro síntese que descreve de maneira didática as operações realizadas no modelo algorítmico aqui apresentado, para cumprir o objetivo de criar um modelo de roteiro que abarque as complexidades do projeto paramétrico para a fabricação digital, ao se considerar o contexto tecnológico específico.

Roteiro de produção digital: processo CAEDM.	
Compreensão arquitetônica previamente projetada: programa de necessidades ambientais, área de cobertura, material construtivo, forma dos componentes etc.	
1.ª Etapa Modelagem das geometrias básicas	a) Ponto de inserção do modelo algorítmico no ambiente tridimensional (p. 201).
	b) Configuração do campo estrutural por matriz de pontos com as medidas da área de cobertura (p. 201-202).
	c) Seleção dos eixos estruturais para que possam ser movimentados (p. 202-203).
	d) Configuração da altura da estrutura ao copiar matriz de pontos anterior (p. 203-204).
	e) Modelagem dos parâmetros iniciais para posterior desenho de vigas e pilares (p. 204-205).

2. ^a Etapa Introdução do cálculo estrutural – Processo <i>CAE</i>	f) Configuração do cálculo estrutural para pilares a partir da distribuição do peso da laje em áreas de influência, com fórmula $S=P/\sigma$ (p. 206-209).
	g) Configuração do cálculo estrutural para vigas a partir da variação dos vãos entre eixos estruturais, com fórmula $L/20$ ou 5% do vão (L) (p. 209-210).
3. ^a Etapa Modelagem dos componentes estruturais – Processo <i>CAD</i>	h) Operação repetitiva de modelagem para peças dos pilares que não recebem vigas: seleção de pontos e criação de linhas e superfícies (p. 213-214).
	i) Operação repetitiva de modelagem para peças dos pilares que apoiam o beiral com mão francesa em arco: seleção de pontos e criação de linhas e superfícies (p. 214).
	j) Operação repetitiva de modelagem para peças dos pilares com mão francesa em arco e encaixe para vigas: seleção de pontos e criação de linhas e superfícies (p. 214-216).
	k) Operação repetitiva de modelagem para peças dos pilares para arco com vão de até três metros: seleção de pontos e criação de linhas e superfícies (p. 217).
4. ^a Etapa Processamento para fabricação digital – Processo <i>CAM</i>	l) Quantificação das peças desenhadas pela organização das informações do modelo algorítmico (p. 218 e 220).
	m) Planificação e nesting das peças desenhadas para fabricação digital (p. 219-221).
	n) Identificação das peças desenhadas para etiquetagem (p. 221).

5.1.4 – Maquete palpável: visualização dos componentes estruturais e estudo de montagem

A maquete palpável possibilitou vislumbrar o processo real de montagem. Os materiais escolhidos foram o *MDF* de três milímetros para a base da maquete e o papel Paraná de um milímetro para as peças da estrutura.

Para o corte decidiu-se por uma máquina de corte a laser, que seria muito próxima, em termos de funcionamento, da máquina de corte à plasma, que corta as chapas de aço. No modelo algorítmico, não foram consideradas as espessuras das peças, que foram modeladas apenas como superfícies, portanto, durante o planejamento da maquete, precisou-se considerar as espessuras para que a precisão fosse alcançada corretamente. Uma planta foi desenhada no *AutoCAD*®, corrigindo as diferenças que a espessura de um milímetro, na escala 1:50, resultaria na distribuição das peças. Portanto, houve um ajuste manual para encontrar a posição correta de todas as peças, umas em relação às outras, na planta baixa. Tal diferença ocasionada foi mínima, imperceptível no modelo final. (Fig. 145)

Figura 145 – Plano de corte corrigido conforme espessuras das peças para base da maquete palpável.

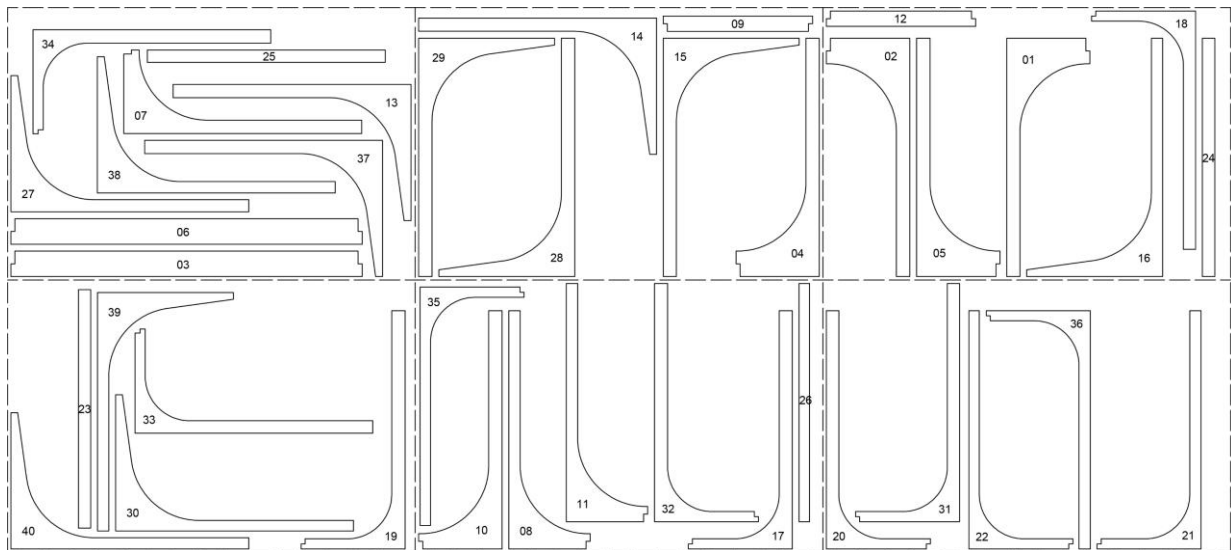


2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Os desenhos das peças distribuídas nas chapas para corte também entraram no *AutoCAD*® para que pudessem ser escalonados para a escala 1:50. Os dois desenhos, da base e das peças, foram então exportados para *PDF* na escala correta, de tal forma, que pudessem ser abertos no *software Illustrator*®, uma vez que a máquina de corte a laser reconhece diretamente a extensão *.AI*, nativa do aplicativo. Dentro do *Illustrator*® foi necessário converter os desenhos agrupados, devido à troca

de formato, em contornos, de tal forma que a máquina pudesse reconhecer as linhas por onde ela corta o material. (Fig. 146)

Figura 146 – Peças estruturais planificadas para corte CNC a laser para maquete palpável.

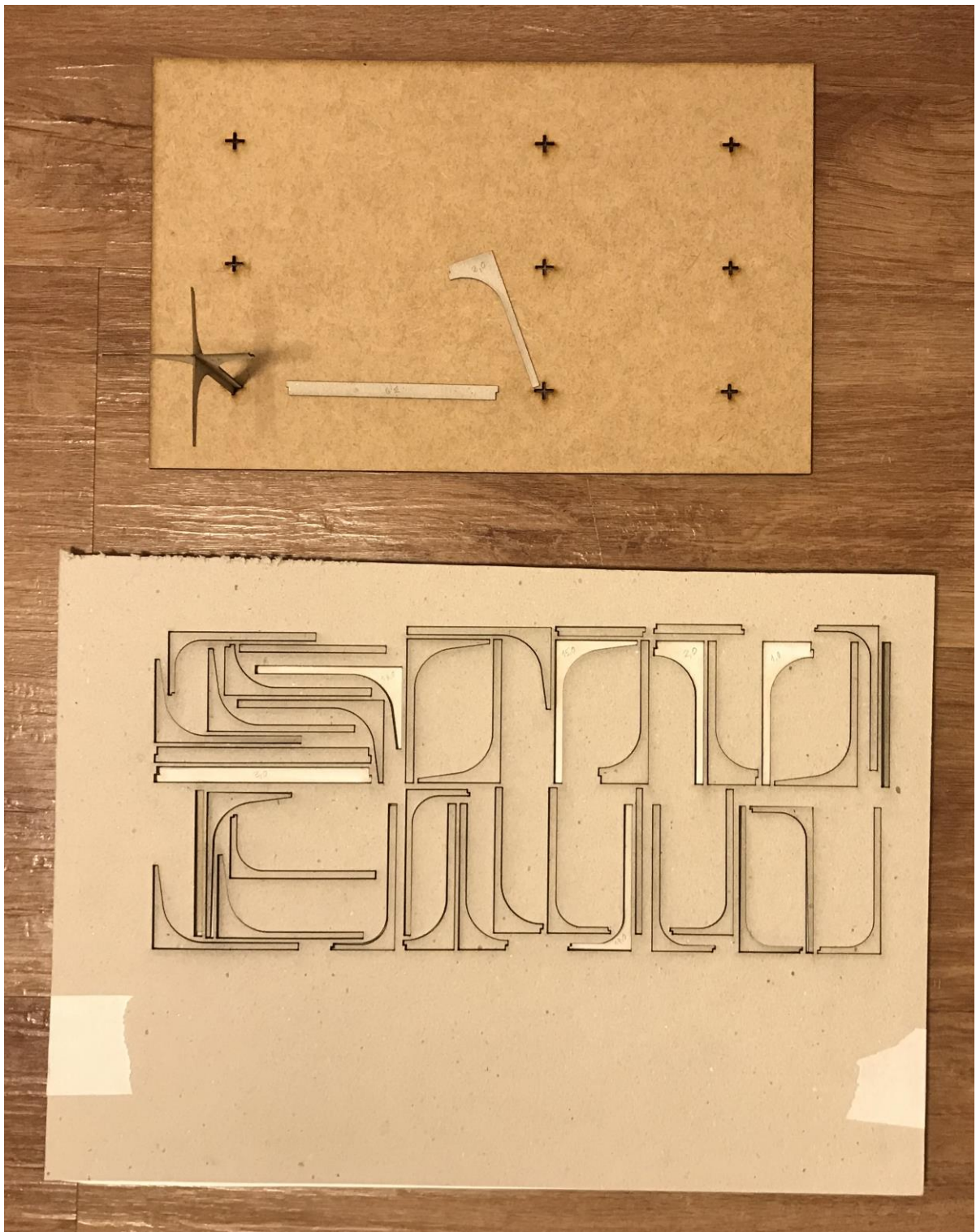


2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

As peças estruturais planificadas para o corte, para montagem da maquete palpável, configuraram o *nesting* que consistiu na racionalização do processo diante da organização das peças, ao se considerar as dimensões das chapas metálicas que seriam cortadas, com intuito de otimização do material. O *nesting* foi programado para distribuir as peças em seis placas, conforme as dimensões do maquinário disponível em fábrica. No entanto, para a maquete palpável foi cortada apenas uma chapa de papel Paraná para representar esse processo. O *nesting* realizado é uma operação que pode estabelecer uma real eficácia do projeto em relação à capacidade produtiva do fabricante.

Pediu-se especificamente que não se desmontassem as peças da base de corte, para não se perder o mapa de montagem e, assim que a máquina realizou o corte, as peças foram identificadas manualmente, com a mesma numeração do mapa no computador (Fig. 147).

Figura 147 – Montagem da maquete palpável.

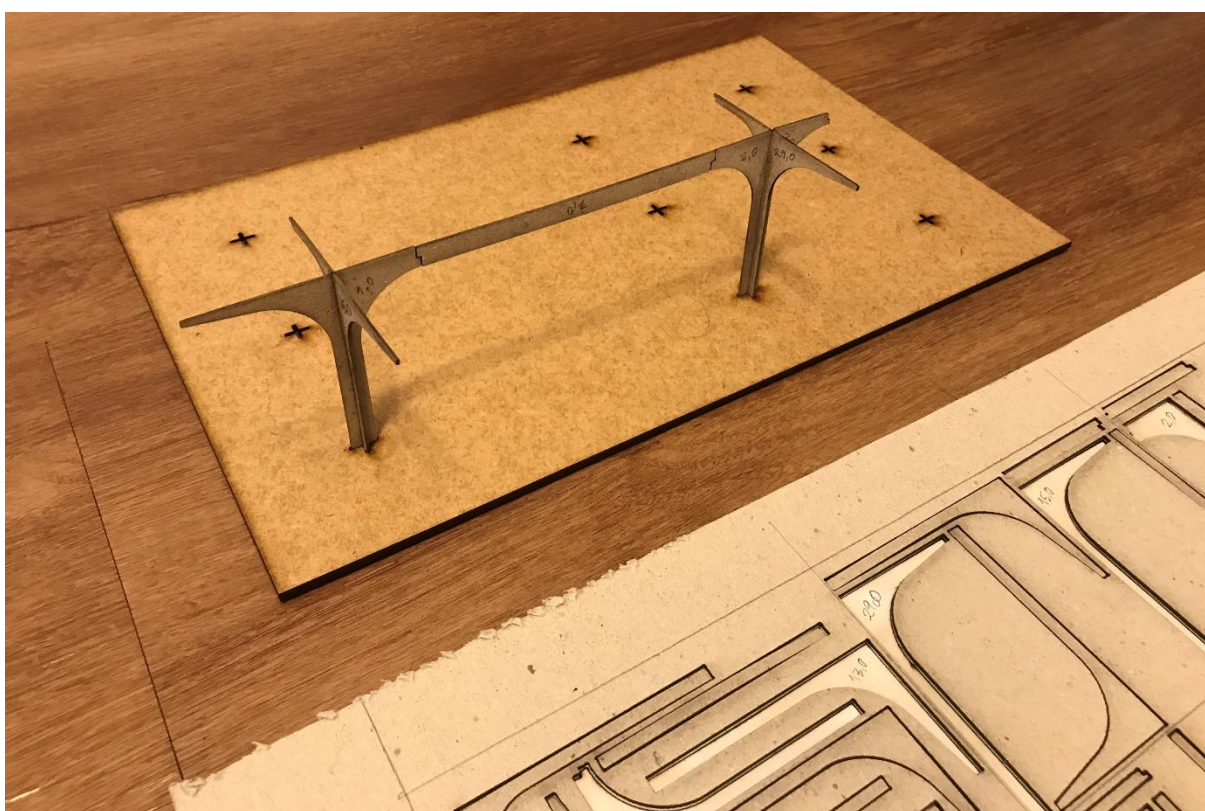


2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

O processo de etiquetagem algorítmica conduziu a montagem da maquete palpável. A colagem das quarenta peças entre si foi bastante complexa e exigiu

precisão manual. Para a construção real imaginou-se um processo de montagem onde as peças seriam parafusadas entre si por peças de encaixe, o que, possivelmente, facilitaria o processo todo, sem depender de serralheria para soldagem. Uma vez as peças montadas, houve a confirmação do nível de precisão do processo, pois mesmo sem colar as vigas nos pilares, ou os arcos entre si, foi possível apenas posicioná-los sobre os encaixes, atuando apenas por gravidade. Imagina-se que na construção real da casa também se manteria um bom nível de precisão. (Fig. 148)

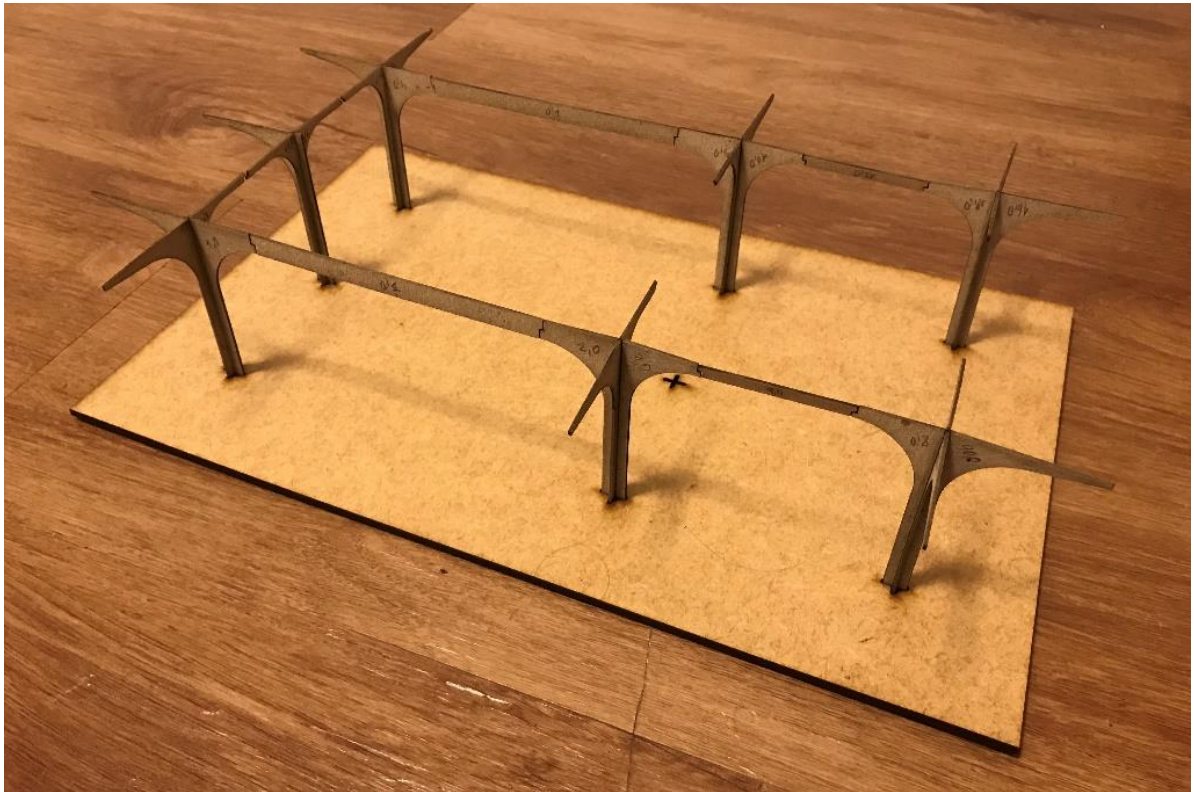
Figura 148 – Processo de montagem da maquete palpável.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Para a maquete palpável, a base assumiu a mesma medida em relação à laje de cobertura, mantendo alinhamento com a ponta das mãos francesas, o que delimitou a sua respectiva área de projeção. Uma vez que o corte CNC possibilita um alto nível de precisão, buscou-se aplicar encaixes milimétricos para a montagem da maquete, como uma forma de testar a viabilidade da solução estrutural concebida. (Fig. 149)

Figura 149 – Encaixes milimétricos.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Figura 150 – Maquete palpável da estrutura da casa compartilhada.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

Ao final, um resultado que expressa esbeltez e precisão das peças (Fig. 150). A renderização do último modelo se assemelhou às proporções da maquete, uma vez que ambos foram gerados pelo mesmo modelo algorítmico (Fig. 151).

Figura 151 – Renderização ilustrativa do modelo final de casa compartilhada.



2019. Crédito da imagem: elaborado pelo autor.

5.1.5 – Roteirização como método para projeto arquitetônico

Tendo em vista a experiência obtida nos experimentos da Catedral de Palmas – TO e das estruturas leves, este último experimento de roteirização da produção digital de uma casa compartilhada otimizou e aprofundou algumas das operações ou processos anteriores. A primeira delas se refere ao processo de identificação e planificação das peças estruturais, que não foi resolvido no projeto da catedral, e a segunda se refere à impossibilidade de conduzir, no roteiro, mais etapas de fabricação digital para processamento do material de construção escolhido, tal como foi problematizado no caso das estruturas leves. No âmbito da sua aplicação à prática de projeto arquitetônico, apesar de demandar um conhecimento mais específico em programação, que é a dificuldade primária, encontrada na maior parte das situações onde tal tipo de técnica é requerida para arquitetura, uma vez rompida a barreira, o processo de roteirização apresenta vantagens em termos do trabalho de modelagem tridimensional. A modelagem algorítmica possibilita o tratamento de diversos problemas simultaneamente, além de deixar a informação tridimensional modelada acessível ao projetista, que pode voltar às suas diferentes partes a qualquer momento. Com relação à aplicação do método de roteirização da produção digital no caso deste terceiro experimento, diante da experiência obtida, foi possível alcançar uma maior

robustez para o trabalho técnico de projeto e desvendou possibilidades para situações diferentes, tais como a integração de análise bioclimática, esquema de drenagem, relação topográfica, entre outras.

Mesmo que já se tenha alcançado um bom nível de detalhamento, o projeto parametrizado ainda pode ser mais detalhado, incluindo diversas operações, como por exemplo, a modelagem das peças para encaixe parafusado; a modelagem da peça de base de cada pilar, que irá se conectar à fundação, a ser milimetricamente executada; a espessura de todas as chapas, considerando o ajuste de dimensão de todas as peças. Outras etapas de pesquisa poderão encontrar um sistema generativo ainda mais completo e mais integrado, a ponto de, hipoteticamente, criar um *software* de projeto especializado nesse determinado tipo de estrutura.

A programação do algoritmo, em alguns momentos, poderia ter sido otimizada, com técnicas mais avançadas de cálculo, mas é uma questão de estilo de programação, pois o arquiteto talvez não detenha um conhecimento matemático aprofundado, mas é capaz de modelar as geometrias necessárias no *software* 3D. Um exemplo disso foram as diversas operações repetitivas ocorridas na terceira etapa da modelagem algorítmica, a princípio a programação funcionou, mas poderiam ter sido resolvidas a partir de uma fórmula mais sintética, que solucionasse o problema das repetições.

Os cálculos estruturais foram os mais básicos, ancorados nas referências bibliográficas mais acessíveis ao arquiteto. Porém, na medida em que se ganhe mais experiência, pode se alcançar maior precisão e até mesmo independência com relação ao cálculo estrutural, a depender do dimensionamento do edifício. Alinha-se, assim, com o debate proposto por Oosterhuis (2012), conforme apresentado no capítulo do experimento da Catedral de Palmas – TO, a respeito de uma qualificação do arquiteto que detiver um tal conhecimento e, desta forma, assumir a responsabilidade por partes da engenharia da construção. O processo de roteirização permite ao arquiteto, por meio da parametrização, visualizar diretamente na interface do *software* as transformações das dimensões das peças estruturais em relação ao aumento ou diminuição do vão e suas respectivas cargas incidentes, tanto para vigas, pilares ou lajes. Nesse sentido, a parametrização amplia o campo de atuação do arquiteto, o que possibilita resultar em um projeto mais compatível com a engenharia, ainda em fase preliminar.

Alguns recursos, como os fatores de correção estética para os pilares e vigas em balanço, foram incorporados às operações estruturais. É interessante notar que algumas dessas decisões compuseram a plástica final da edificação, portanto, a engenharia seguiu ao lado da arquitetura, no caso da segunda etapa da definição, que contemplou o pré-dimensionamento estrutural.

A técnica de parametrização do projeto arquitetônico torna mais eficiente a aplicação da fabricação digital. Pode ser mais utilizada na prática projetiva, pois abre um campo de atuação e qualifica o arquiteto na produção industrializada e no detalhamento automatizado. De acordo com a revisão de literatura, feita durante a pesquisa desta tese, considera-se que a aplicação dessas técnicas à arquitetura contemporânea, na maior parte dos casos, serviu para a resolução de espaços formalmente complexos ou de estruturas geometricamente complexas. No entanto, tais soluções tecnológicas podem ser humanizadas, utilizadas para finalidades cotidianas. Alguns exemplos são os trabalhos de Glenda Amayo Caldwell e Mirko Guaralda (CALDWELL; GUARALDA, 2016) e Varela e Sousa (2015) que trabalham as questões regionais ou locais de produção, além do trabalho de Burry (2011) ao complementar partes da construção da Sagrada Família de Gaudí, por meio da produção digital.

Ressalta-se que o projeto parametrizado é uma etapa a ser considerada na produção arquitetônica. Tentou-se aqui misturá-la às outras etapas do projeto, de desenho e modelagem 3D, para verificar como ela pode se adequar. Observou-se o seu potencial na fase de detalhamento do projeto, uma vez que possibilita a automatização de diversas etapas que demandariam um tempo considerável em um processo comum de desenho arquitetônico. Com o projeto paramétrico o tempo poupado não é de representação, mas sim de produção, pois a orienta diretamente para o processo *file-to-factory*, onde a fábrica recebe todos os comandos para fabricação e não apenas a representação arquitetônica.

Esforça-se em conectar projeto paramétrico e prática arquitetônica comum, com a intenção de esclarecer como pode ocorrer tal aplicação, o que é uma questão determinante aqui, uma vez que o uso de tais técnicas parece ser subutilizado no contexto, principalmente para uma arquitetura mais cotidiana. Reforçar a aplicação na prática profissional pode revelar benefícios capazes de ampliar o campo de atuação da profissão.

Dentro do quadro de *softwares BIM*, as ferramentas “*BIM* de projeto tem um conjunto crescente de famílias de objetos paramétricos predefinidos [...], mas estas são completas somente para construções de tipologia mais padronizada.”. (EASTMAN, 2014, p. 35). O *Revit*® por exemplo tem uma interface chamada *Dynamo*®, que troca pacotes de informação com o *Grasshopper*®, mas não é tão completa. O *ArchiCAD*® tem uma interface com o próprio *Grasshopper*®, mas também é um *software* feito basicamente para facilitar os métodos de representação, ou encontrar as informações para construção de sistemas estandardizados. Quando se pensa um projeto personalizado, o *Grasshopper*® aponta uma solução, pois diversos desenvolvedores do âmbito industrial utilizam a plataforma, possibilitando ao projetista uma variedade de funções que outros aplicativos não contemplam, como, por exemplo, a interface de manipulação do braço robótico.

Normalmente, o tempo de montagem de uma definição orientada para produção é extenso, em algumas vezes maior do que o tempo de montagem de um modelo ponto a ponto. Porém, ao se dominar o sistema de parametrização, a modelagem algorítmica se torna tão rápida quanto a modelagem ponto a ponto, portanto, acaba sendo mais eficiente.

Ressalta-se que apenas parâmetros de cálculo ou fabricação foram implementados no algoritmo aqui apresentado. Todavia, é possível incorporar uma variedade de outros parâmetros, tais com o bioclimatismo, a acústica, a drenagem pluvial etc. O projeto parametrizado se torna um sistema, conectando diversas partes da arquitetura entre si.

Com relação à etapa de processamento para a fabricação digital, com poucos componentes da definição *Grasshopper*® foi possível automatizar toda uma etapa produtiva que, segundo o depoimento de Vicente Muñoz, ocupou boa parte do trabalho de planilhamento das peças para execução na fábrica, por exemplo, da construção do Beijódromo. Então, ao se vincular o projeto com o processamento para a fabricação é possível poupar uma frente de trabalho inteira que necessitaria transpor detalhes do projeto arquitetônico para planilhas a serem utilizadas pela fábrica. Em uma breve análise comparativa com o trabalho de desenho arquitetônico, o método de roteiro de produção digital facilitou as relações do detalhamento para execução de obra, ao assumir uma fundamentação algorítmica programada de maneira prática.

Com relação à simulação construtiva, um dos objetivos centrais do roteiro, evidentemente não foi possível executar a estrutura no material escolhido e em escala real, pelas óbvias limitações financeiras normalmente impostas à pesquisa científica. Mesmo assim, o teste material do sistema foi uma fase obrigatória para comprovar o nível de precisão como um todo. Então, a maquete palpável se tornou o instrumento de avaliação da etapa de construção da casa e, por meio dela, foi possível testar o mapa de montagem e seus respectivos processos.

O possível processo de montagem da obra real foi observado segundo uma perspectiva de automontagem por parte dos próprios habitantes, o que foi apenas parcialmente simulado durante a montagem da maquete palpável. Mesmo assim, já se conseguiu reconhecer a importância do sequenciamento de montagem de cada peça, uma vez que seriam parafusadas entre si por encaixes. Este terceiro experimento de roteiro de produção digital previu o esquema de montagem da possível obra real apenas de maneira superficial, deixando-o em aberto para que pesquisas futuras possam solucionar este aspecto. Outra questão deixada ainda em aberto foi com relação à fundação que precisaria ser construída milimetricamente, uma vez que receberia as chapas de composição de cada perfil de pilar em peças que, também, foram brevemente previstas aqui. No entanto, conforme o partido da casa compartilhada, tanto a sua fundação quanto o seu esquema de ocupação seriam processos independentes da fabricação dos perfis metálicos estruturais aqui detalhados e teriam que se adaptar às circunstâncias dadas.

A questão da espessura das chapas das peças estruturais foi resolvida na maquete com a escolha de um material que pudesse ser fino o suficiente, para simular as proporções da construção real, mas sem perder suas propriedades físicas. O problema de o algoritmo ainda não contemplar diretamente as espessuras das peças ocorreu, justamente, porque se sabia que a construção real não seria contemplada e que isso não iria prejudicar a qualidade final da maquete.

Há um rebatimento desse problema na solução vislumbrada para a construção real da casa, que é o problema de definição da espessura das próprias chapas em aço. Existem cálculos empíricos, que poderiam, inclusive, ser programados no algoritmo, para dimensionamento das espessuras das chapas, tanto para pilares quanto para vigas. No entanto, a decisão foi mais simplificada, primeiro, em conformidade com medições *in loco* dos pilares do Beijódromo, que foram produzidos

com chapas de meia polegada. Segundo, conforme experiência construtiva do próprio Professor Doutor Neander Furtado Silva que, também, coincidiu com a escolha da chapa de meia polegada.

O esquema de ocupação foi uma decisão que respondeu à necessidade de tornar a estrutura mais econômica, bem como a questão de as peças serem montadas pelo próprio habitante, que poderia adquirir um kit personalizado de acordo com suas exigências. Posteriormente, poderia se apropriar da estrutura da maneira como quiser, financeiramente, temporalmente, esteticamente.

Os processos de parametrização e fabricação digital aplicados à habitação já foram explorados de diversas maneiras (DUARTE, 2005; MORORÓ [et al.], 2012; NARDELLI, 2014; BRANCO [et al.], 2017; NARDELLI; PEREIRA, 2017), principalmente em consideração à abordagem social. Nesta tese não se enfatiza propriamente tal abordagem, uma vez que se assume uma perspectiva tecnológica sobre o sistema produtivo projetado algoritmicamente. O trabalho de Peter Eisenman para as casas seriadas, conforme categorização de Gabriela Izar (2015), foi uma referência, bem como o trabalho de Greg Lynn (2002) para a *Embryologic Housing*, no sentido dos métodos de projeto arquitetônico para habitação.

A definição do “*objectile*” proposta por Bernard Cache (1995), em referência à teoria “*The Fold*” de Gilles Deleuze é, no entanto, o principal alinhamento teórico aqui considerado. Carpo desvenda o seu significado da seguinte maneira: “[...] o *objectile* não é um objeto, mas um algoritmo – uma função paramétrica que pode determinar uma infinita variedade de objetos, todos diferentes (um para cada conjunto de parâmetros) porém todos similares (uma vez que a função subjacente é a mesma para todos).⁵⁴” (CARPO, 2011, p. 40, tradução nossa). O método de roteiro de produção digital é capaz de criar *objectiles* arquitetônicos ao invés de apenas objetos singulares e, desta forma, o arquiteto não é autor de um único projeto ou obra, mas das instruções de construção que podem ser parametricamente reguladas a qualquer momento.

O estudo de Alexander Lopes de Aquino Brasil e Juarez Moara Santos Franco (BRASIL; FRANCO, 2019), recentemente publicado, avança na mesma direção proposta por esta tese. A base do raciocínio é semelhante, a respeito da integração

⁵⁴ Original: “[...] the *objectile* is not an object but an algorithm – a parametric function which may determine an infinite variety of objects, all different (one for each set of parameters) yet all similar (as the underlying function is the same for all).” (CARPO, 2011, p. 40).

do processo *CAE-CAD-CAM* no projeto habitacional, mas não se atém a ele, avançando em um sistema de fechamentos que não detalha as esquadrias. O projeto analisado por Brasil e Franco (2019) utilizou a madeira, diferindo, assim, da estrutura metálica aqui proposta. Outra distinção se refere aos cálculos que foram realizados fora do *Grasshopper*® e inseridos na definição, posteriormente, por meio de *plug-in*, para que, ao final, se obtivesse uma simulação estrutural do desempenho das geometrias modeladas, pela análise por elementos finitos. Diferentemente, nesta tese, abre-se a possibilidade de um cálculo estrutural diretamente associado ao sistema generativo, portanto, a informação correta, a respeito das dimensões dos perfis, já pode ser dada às peças, sejam pilares ou vigas. A principal diferença, no entanto, é que, no experimento aqui apresentado, o sistema generativo constituiu um único roteiro de produção digital, desde a representação das formas finais de cada peça metálica até sua sistematização para pré-fabricação digital.

Mesmo com tantos avanços ainda possíveis e alguns problemas que ainda persistiram, o projeto da casa compartilhada cumpriu com os principais objetivos propostos. A partir de agora seria possível melhorar o algoritmo a ponto de detalhá-lo inteiramente para a construção, na tentativa de automatizar o máximo de processos complexos, que em um sistema de produção comum só seria alcançado com um tempo considerável de trabalho.

5.1.6 – Considerações sobre o método de roteirização do projeto arquitetônico

O desenho de perspectiva e o croqui à mão livre, bem como a modelagem tridimensional padrão em *softwares* como *SketchUp*®, *AutoCAD*®, *3DS MAX*®, *Blender*®, ou em *softwares BIM*, tais como *Revit*® e *ArchiCAD*®, são técnicas difundidas nas faculdades de arquitetura e meio profissional correspondente. No entanto, a modelagem algorítmica ainda apresenta uma defasagem no ensino e aplicação profissional. Talvez pelo perfil dos usuários, ainda não tão conhecedores das habilidades básicas de programação, talvez pelo perfil dos fabricantes, ainda não tão detentores das tecnologias digitais, a lacuna na construção civil brasileira ainda persiste.

O ensino da técnica só se tornou prático na última década com a difusão do *software Grasshopper*®, incorporado ao *Rhinoceros*®, uma vez que possibilitou um sistema de programação gráfica, que facilitou o trabalho do designer ou arquiteto. O

que deveria ser feito, de fato, seria a incorporação, da mesma forma como ocorreu com o *AutoCAD*®, do ensino da técnica nas escolas de arquitetura, pois desvenda possibilidades industriais, vinculadas à indústria 4.0 e a sistemas construtivos controlados por computador, já utilizados por países da Europa e América do Norte.

A inclusão do pré-dimensionamento estrutural no modelo algorítmico demonstrou a integração das disciplinas de construção civil e de projeto de arquitetura. Consequentemente, possibilitou vislumbrar uma maneira didática de explicar a relação entre arquitetura e engenharia por meio gráfico, o que se considera essencial para o ensino acadêmico, tendo em vista a dificuldade geral dos estudantes e arquitetos na visualização das operações de cálculo.

Este experimento confirmou a ideia de que é possível personalizar os sistemas *BIM* por meio, por exemplo, de um processo de projeto *CAEDM*, que começa na engenharia, passando pela arquitetura, até a fabricação. E, principalmente, confirmou a tese da reprodutibilidade das técnicas de fabricação utilizadas por *Lelé*.

CONCLUSÃO

Considerações finais

Atualmente, a diversidade de elementos que podem ser compatibilizados concomitantemente em um projeto de arquitetura (sistema estrutural, elétrico, acústico, normatizações, etc.) torna cada vez mais complexa a prática de projeto, que envolve, inclusive, o traço autoral de cada profissional. A maneira de lidar com uma multiplicidade de condicionantes convergindo para uma única solução, ou um conjunto de possíveis soluções, requer um processador de dados geométricos, tal como o *software Rhinoceros®* em conjunto com sua interface de programação visual intitulada *Grasshopper®*, que, no caso específico deste trabalho, foram utilizados para a simulação dos experimentos apresentados. Todavia, independente do programa utilizado, o pensamento algorítmico (TERZIDIS, 2006; WOODBURY, 2010) foi o que, no caso desta tese, possibilitou orientar uma prática capaz de fixar organizadamente uma série de elementos distintos em favor de sua fabricação controlada por computador, sintetizando, assim, o que se compreende como produção digital em arquitetura.

Para se idealizar um detalhe de execução eficiente é preciso que o projetista detenha conhecimento sobre os sistemas construtivos, sobre os métodos de fabricação, sobre as propriedades físicas dos materiais, sobre a utilização de *softwares* que facilitem o trabalho de detalhamento, entre outros fatores. Se o arquiteto conseguir lidar com tais aspectos simultaneamente durante o projeto, há um ganho de eficiência. No entanto, para alcançar tal possibilidade é necessário que o arquiteto busque técnicas avançadas de produção do projeto executivo, como a parametrização da geometria que é, por sua vez, bem compreendida intuitivamente, uma vez que se utilizam técnicas geométricas no trabalho de representação e documentação do projeto.

Embora a presença de disciplinas específicas de *BIM* e parametrização estejam sendo incluídas nos currículos acadêmicos, de acordo com aparato teórico encontrado em Mitchell (1977) ou Eastman (2014), entre outros autores já mencionados, o conhecimento sobre a parametrização precisa ser aprofundado pelo profissional com pouco domínio de tal técnica. Deve se considerar que a aplicação eficiente dessas técnicas possibilita o uso de tecnologia digital, disponível em algumas fábricas e construtoras, para construção de espaços arquitetônicos. A disciplina da arquitetura, por seus processos metodológicos, já solicita, atualmente, uma interface de

representação computacional, tal como o *AutoCad*®. Consequentemente, o uso da parametrização pode se estabelecer como uma outra interface para desenvolvimento de projetos, com recursos de aprendizagem acessíveis.

É preciso articular a técnica de parametrização em um contexto cultural mais abrangente. O arquiteto pode se apropriar da parametrização desde as etapas de criação, documentação e detalhamento de um projeto, até as etapas de fabricação e construção da obra. A técnica trabalha por meio de métodos computacionais que são diferentes do uso do computador como um meio de representação, por isso se faz necessária uma cultura existente que a utilize em seu favor para o desenvolvimento de projetos mais bem amparados do ponto de vista científico. Diante desse ponto de vista, Yehuda E. Kalay (1999) defende que as etapas podem ser desenvolvidas em colaboração e o arquiteto pode assumir um posicionamento ativo dentro do processo construtivo que, necessariamente, envolve diversas especialidades, como iluminação, engenharia, administração, normatização. Portanto, observa-se que tal processo está em desenvolvimento e a técnica da parametrização incluiu métodos que tornam o processo mais aplicável.

Apona-se a necessidade de maior transversalidade da aplicação tecnológica no ensino da arquitetura. Acredita-se que, atualmente, há uma aproximação da arquitetura em direção à engenharia e à construção civil, tanto por uma necessidade contemporânea de normatização cada vez maior dos sistemas produtivos, quanto pela maior facilidade no uso de técnicas mais avançadas. Nesse sentido, entende-se que, de fato, há uma necessidade de aprofundar o conhecimento nas faculdades de arquitetura, de forma a se ultrapassar a mera utilização dos *softwares* de modelagem tridimensional e simultaneamente ensinar aos alunos a fundamentação teórica matemática ou física dos próprios *softwares*. Ou seja, prover aos estudantes maior erudição sobre a temática de tal forma que as ferramentas digitais não substituam o verdadeiro conhecimento geométrico e abstrato indispensáveis para o profissional de arquitetura.

Há uma dimensão histórica a respeito da aplicação tecnológica na disciplina que não pode ser menosprezada, e a valorização disso não se sobrepuja ao currículo acadêmico vigente das universidades brasileiras, mas que se acrescenta às teorias que normalmente são propostas nos cursos de arquitetura e urbanismo. Ressalta-se que o urbanismo como disciplina associada à arquitetura também já apresenta um

histórico de estudos (MARTIN; MARCH, 1972) para desenvolvimento da produção digital e que não se aprofundou aqui por uma questão metodológica.

A princípio, o uso do computador como uma ferramenta de representação tem atendido às demandas de um processo com muitas etapas artesanais aliadas ao uso de materiais padronizados em série. No entanto, houve um desenvolvimento técnico-tecnológico, ocorrido nos últimos vinte anos (CARPO, 2011), que vem possibilitando ao arquiteto trabalhar de forma avançada. Nesse sentido, a fabricação digital pode ser impactante, pois possibilita o uso de técnicas não estandardizadas de construção como o processamento personalizado de materiais construtivos, uso de impressão 3D na construção civil, fabricação robótica; novos protocolos como racionalização dos componentes, articulação de processo *file-to-factory*; novas operações como produção sob encomenda ao invés de produção para estoque, reorganização do trabalho de construção; e novos processos de montagem como relação homem-máquina, otimização do canteiro. Portanto, atualmente, o nível de complexidade de execução de uma obra pode superar o padrão estabelecido pelo sistema estandardizado, o que exige métodos de projeção que consigam lidar apropriadamente com isso.

É importante ressaltar que os métodos construtivos por meio da produção digital podem atuar na redução de custos de produção e de tempo, no sentido que os processos se tornam racionalizados, otimizados e compatibilizados, o que pode afetar economicamente obras de grande porte. Nesse sentido a produção digital pode apresentar soluções para incrementar, por exemplo, políticas de habitação social.

A utilização da parametrização durante a etapa de projeto atende esse tipo de demanda, tanto para a fase de detalhamento e fabricação de uma obra complexa, quanto para documentá-la tecnicamente, o que se constitui um novo quadro de mudança nos processos de projeto do arquiteto. Contudo, necessita-se, ainda, de uma adequação generalizada em relação ao uso das tecnologias de fabricação digital tanto da parte dos projetistas, que precisam adaptar suas respectivas práticas, quanto da parte das fábricas, que devem operar de forma avançada com relação às aplicações na construção civil.

Contribuições da tese

Aqui se apresentam os resultados da tese, em relação à questão acadêmica, à parametrização, ao trabalho de investigação experimental e laboratorial, ao panorama da teoria e história da robótica em arquitetura, à precursão de Lelé no campo da fabricação digital no contexto brasileiro, à aplicação da parametrização ao projeto arquitetônico, à produção digital de estruturas leves em contextos econômicos desfavorecidos, à aplicação da fabricação robótica em arquitetura e ao método de roteirização do projeto arquitetônico. Para cada resultado faz-se uma respectiva consideração, discutindo-os e analisando-os em relação ao processo de pesquisa e investigação da produção digital em arquitetura.

Sobre a parametrização

Buscou-se utilizar a parametrização em uma diversidade de projetos de arquitetura, com a finalidade de verificar a sua adaptabilidade em relação às condicionantes de cada situação. Desde o projeto da Catedral de Palmas – TO, onde a técnica foi utilizada em relação a uma prática comum de projeto arquitetônico; passando pelo projeto de estruturas leves, onde pôde se perceber como a técnica correspondeu aos processos construtivos; até o projeto da casa compartilhada, onde foi demonstrado o seu potencial de elencar diversas etapas produtivas. Desta forma, percebeu-se como o método de roteirização da produção digital pode contribuir ao projeto arquitetônico, automatizando etapas de trabalho e agregando valor científico.

Na medida do possível, tentou-se expandir o campo da parametrização, por meio da utilização do *software Grasshopper®* no projeto arquitetônico, no contexto brasileiro. A técnica oferece muitas vantagens para automatização do projeto, entre elas a possibilidade de criar sistemas generativos a partir de um conjunto de algoritmos que personalizam a modelagem da informação para construção, ou *BIM*. Outra vantagem é possibilitar o controle do braço robótico por meio do *add-on* disponibilizado pela *KUKA Robotics*, que oferece a interface *KUKA/prc®* para *Grasshopper®*. Portanto, o conhecimento do *software* permite desvendar ao projetista um método de relacionamento com a indústria, uma vez que favorece o processo *file-to-factory* para uma diversidade de tipos de fabricação digital.

Trabalho de investigação experimental e laboratorial

Reforça-se o carácter experimental dos procedimentos metodológicos deste trabalho, uma vez que na tese prevaleceram ações práticas que foram, posteriormente, sistematizadas em um conteúdo teórico, ou seja, os métodos de investigação se concentraram na verificação empírica dos objetivos aqui propostos e em trabalho laboratorial tanto na colaboração com o Coletivo *Voxel Lab*, quanto no estágio de doutorado no *DFL FAUP*.

A partir de um estudo do estado da arte a respeito do projeto e fabricação digitais, que incluiu a fabricação robótica, realizou-se uma série de experimentos motivados, a princípio, pela teoria da *autopoiesis* da arquitetura de Schumacher (2011). Os três experimentos pautaram-se pela tentativa de automatizar o máximo das etapas de projeto e construção arquitetônicos, por meio do que se conceituou aqui como produção digital, entendida como a fusão do projeto e fabricação digitais, por meio das técnicas de parametrização.

Observou-se no primeiro experimento a integração da técnica de parametrização à prática arquitetônica de Paulo Henrique Paranhos, onde houve um diálogo entre o desenho e a modelagem algorítmica. No segundo experimento, a integração da parametrização às técnicas artesanais de construção de arquiteturas simples. No último experimento, a simulação de um projeto estrutural de um modelo habitacional, automatizado por um processo *CAEDM*, orientado para a fabricação digital. Portanto, deve-se valorizar o tempo dispendido na elaboração de sete modelos algorítmicos que constituíram os projetos que, por sua vez, seguiram estritamente os métodos propostos aqui, ao utilizarem o *software Rhinoceros®* e sua plataforma de programação visual *Grasshopper®*. Com isso, almejou-se a fabricação controlada por computador sempre que possível, mas, também, adaptando-se aos processos artesanais e mecânicos quando da impossibilidade de utilização das tecnologias digitais.

Os experimentos envolveram ações para além do trabalho acadêmico onde houve a necessidade de participação em todas elas. Conversas e alinhamentos de projeto com o arquiteto Paulo Henrique Paranhos. Entrevistas com profissionais e professores para compartilhar ideias e conhecimentos. Organização de atividades de trabalho juntamente com equipes de projeto. Negociações com produtores e fornecedores. Atividades de projeto e construção real. Portanto, os esforços aqui

muitas vezes ultrapassaram os limites da atividade acadêmica, para que se pudesse observar a ocorrência da integração da produção digital à prática arquitetônica.

Os métodos de investigação que foram pautados por ações experimentais e que consistiram na estrutura da tese, representam o dimensionamento do esforço prático em realmente testar o conhecimento de produção digital na arquitetura, mesmo que uma importante contribuição teórica tenha sido realizada ao acrescentar o campo da robótica aos estudos realizados no LFDC da FAU UnB.

Panorama da teoria e história da robótica em arquitetura

Mesmo que a fabricação robótica não tenha sido considerada na prática em nenhum dos experimentos que compuseram a tese aqui apresentada, ao incluí-la ao estado da arte sobre a fabricação digital, acredita-se contribuir às pesquisas desta universidade. No sentido de trazer uma revisão de literatura que possibilite um reconhecimento histórico e que não se restrinja aos estudos sobre as aplicações mais recentes no campo arquitetônico, abarca-se as especulações teóricas de Frederick Kiesler (PHILIPS, 2017), *Archigram* (COOK, 1960), e, também, o trabalho do grupo *New-Territories*.

As pesquisas acadêmicas iniciadas por Nicholas Negroponte (1970), no MIT, na década de 1960, foram retomadas com impacto a partir do início dos anos 2000 e, atualmente, estão espalhadas por diversos países. No Brasil, as pesquisas ainda não avançaram neste campo, mas os indícios de maior acessibilidade às técnicas de controle e aos maquinários robóticos ajudam a prever a breve inserção deste tipo de produção no contexto. Nesse sentido, tal estudo configura a urgência na inclusão da robótica no âmbito da construção civil e das escolas de arquitetura, uma vez que houve uma verificação a respeito da aplicação da tecnologia desde a menor até a maior escala e em circunstâncias distintas.

Precursão de Lelé no campo da fabricação digital no contexto brasileiro

Uma importante contribuição foi o reconhecimento de Lelé como precursor brasileiro da utilização da fabricação digital, uma vez que é considerado pelos seus processos de racionalização construtiva e deve, também, ser reconhecido por esta característica tecnológica de sua arquitetura. O arquiteto precursor no uso de métodos de pré-fabricação e expoente do uso da argamassa armada deve, também, ser

compreendido pelo uso inovador da tecnologia CNC que o possibilitou construir edifícios curvilíneos, tais como da rede de hospitais Sarah Kubitschek e o Beijódromo desta universidade.

No Beijódromo, Lelé utilizou os serviços de uma fábrica metalúrgica local e finalizou o projeto inteiramente dentro do seu Instituto Brasileiro de Tecnologia do Habitat – IBTH. Portanto, compreende-se que detinha o método de produção junto à indústria fornecedora, que, em 2010, já estava preparada para prover tal tipo de produção. A entrevista com Vicente Muñoz revelou possibilidades de investigação sobre o trabalho de Lelé, diante do registro aqui anexado sobre os processos construtivos do arquiteto.

Aplicação da parametrização ao projeto arquitetônico

O experimento de aplicação da produção digital no projeto arquitetônico da cobertura da Catedral de Palmas – TO, de autoria do arquiteto Paulo Henrique Paranhos, contribuiu no sentido de utilizar a parametrização *Grasshopper*®, em conjunto com a fabricação digital, para prototipagem de pequenos modelos palpáveis, como ferramentas para os processos de concepção e detalhamento executivo de estruturas metálicas.

A parametrização *Grasshopper*® apresentou agilidade e flexibilidade durante as etapas de concepção, possibilitando o teste de uma variedade de opções em tempo mais reduzido do que a modelagem ponto a ponto. Durante as etapas de detalhamento, o sistema generativo produzido permitiu alterações de projeto sem a necessidade de remodelagem completa, possibilitando, assim, o reajuste automático dos modelos 3D a partir da transformação de parâmetros delimitados para cada situação. Tal sistema possibilitaria detalhar centenas de encaixes diferentes de maneira automatizada, por meio de um processo repetitivo de intersecções, cortes e planificações de diferentes peças que comporiam a treliça espacial da cobertura da catedral. Além disso, gerou-se automaticamente os modelos que foram impressos em processo aditivo por uma impressora 3D. Desta forma, foi possível compreender como o arquiteto pode se aproximar da engenharia das edificações, podendo assumir a responsabilidade de certas etapas do projeto executivo de estruturas complexas, por meio de técnicas muitas vezes subestimadas pela prática profissional.

Produção digital de estruturas leves em contextos econômicos desfavorecidos

O experimento de aplicação da produção digital no projeto e construção de estruturas leves, em colaboração com o Coletivo *Voxel Lab*, contribuiu ao testar a utilização da parametrização *Grasshopper*® para a pré-fabricação e montagem de estruturas simples e materiais leves. A parametrização interligou os métodos construtivos, pois, na medida em que se criaram algoritmos para orientar a fabricação de peças e elementos construtivos, o projeto arquitetônico não se restringiu à representação da construção, mas descreveu as próprias etapas de execução de uma obra. Por meio do *Grasshopper*® essa descrição pode ser orientada tanto para métodos construtivos artesanais, quanto para a fabricação digital do braço robótico, por exemplo.

No caso deste segundo experimento, buscou-se alcançar sempre a máxima automatização dos meios de execução, dentro das limitações financeiras de cada um dos três projetos que foram executados. No primeiro projeto, intitulado “O Móvel”, quase não se utilizou a fabricação digital, diante das limitações financeiras e tecnológicas dos fornecedores industriais, restringindo-se ao uso de máquinas não controladas por computador e muito trabalho artesanal. No segundo projeto, intitulado “Fechamento em papelão”, a fabricação digital poderia ser utilizada para processamento de todo o material a ser montado, mas por questões financeiras, utilizou-se uma máquina de corte mecânica em conjunto com uma máquina laser *cutter* para o corte de alguns detalhes nas peças, além do trabalho artesanal de montagem. No terceiro projeto, intitulado “*Parklet* multifuncional”, não houve processamento do material a ser montado, poupando esta etapa de trabalho, que se restringiu à parametrização do processo de concepção formal e à criação do mapa de montagem.

Procurou-se seguir a teoria da *autopoiesis* da arquitetura de Schumacher (2011), mas se observou que nem sempre foi possível automatizar as etapas de execução de uma obra, principalmente diante de limitações econômicas. Nesse sentido, compreenderam-se as dificuldades empíricas de implementação de tal teoria que se torna inacessível em contextos menos favorecidos economicamente, devido à sua independência inerente às tecnologias avançadas. No caso, o que geralmente respondeu às dificuldades tecnológicas foram processos artesanais e mecanizados. Portanto, a teoria da arte foi aqui considerada para o amparo da prática que priorizou

materiais que estivessem à disposição ou que pudessem ser economicamente viáveis em termos de construção.

A presença da teoria sobre produção digital na prática de arquitetura foi essencial para o desenvolvimento do segundo experimento, visto que o coletivo formado por arquitetos e estudantes teve a experiência acadêmica em projeto paramétrico⁵⁵. Essa condição formulada pelo ensino possibilitou não apenas a construção dos projetos, mas também possibilitou um ganho na racionalização projetiva em âmbito teórico.

Contribuiu-se, assim, com um trabalho experimental da relação entre produção artística e produção digital, que ocorreu dentro do campo das estruturas leves, por meio de uma série de exemplos inteiramente construídos por equipe de arquitetos e estudantes de arquitetura. Considerando-se um posicionamento crítico em relação à mera utilização tecnológica e voltando-se para sua contextualização socioeconômica.

Aplicação da fabricação robótica em arquitetura

O estágio de doutorado no *Digital Fabrication Laboratory – DFL* da Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto – FAUP foi imprescindível para a compreensão da maneira como a fabricação robótica pode favorecer as técnicas de construção civil na atualidade. A visão pragmática e humanista da FAUP influencia diretamente as investigações do *DFL*, onde se buscam resultados palpáveis à prática arquitetônica comum. Ali o braço robótico é posto a serviço da reprodução de técnicas tradicionais ou da inovação por meio delas.

O pragmatismo das investigações conduziu à viabilidade financeira das soluções propostas, onde o robô poderia ser utilizado para a pré-fabricação dos elementos construtivos, em detrimento da resolução da complexidade formal e construção *in loco*, investigadas em outras instituições europeias. A construção de arcos, o empilhamento de tijolos, a escultura em pedra, a estereotomia, são alvos de investigação do *DFL* FAUP, além do interesse no processamento de materiais locais, como a produção em cortiça.

A racionalidade na utilização das tecnologias avançadas, também, conduziu à praticidade de uso do braço robótico para arquitetura, por meio da interface

⁵⁵ Entre os anos de 2014 a 2017 ministrei, como professor adjunto do Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, curso de extensão sobre “Processos de criação e produção digital em arquitetura”.

KUKA/prc® que é utilizada dentro do *Grasshopper*®, ao invés de outras técnicas de programação. Considera-se, ainda, a importância atribuída aos materiais de construção quando da utilização da fabricação robótica, no sentido de que o braço robótico é capaz de ser programado para o processamento de diversos materiais construtivos, o que possibilita a compreensão de uma tectônica robotizada.

As orientações do Professor Doutor José Pedro Sousa foram decisivas para orientar o projeto arquitetônico que compôs o terceiro experimento desta tese, conduzindo à sustentabilidade dos meios e escolha racional de métodos e materiais disponíveis no local de construção, independentemente do tipo de tecnologia a ser empregada.

Método de roteirização do projeto arquitetônico

O experimento de aplicação da produção digital no projeto de uma casa compartilhada é onde esta tese foi realizada empiricamente, a partir de uma série de ações que simularam a prática de um projeto básico de arquitetura. Nele pôde se reproduzir partes do processo de projeto e execução de Lelé para o edifício do Beijódromo. Primeiro pela escolha do material, depois pela junção entre arquitetura e engenharia, depois pelo processamento do material, planilhamento e corte CNC. Os relatos de Vicente Muñoz, em conjunto com os estudos já realizados sobre o edifício, auxiliaram a compreensão daquilo que deveria ser feito em termos de processo de projeto para se alcançar a reprodução dos métodos de Lelé, que foram alcançados na medida do que foi possível dentro das limitações da pesquisa científica.

Outros estudos de aplicação das técnicas de parametrização já foram conduzidos, como o trabalho de investigação de Brasil e Franco (2019), mas aqui diferencia-se em aspectos metodológicos e, principalmente, organiza-se todo o projeto em um único roteiro de produção digital. Portanto, uma das principais contribuições do último experimento aqui apresentado foi demonstrar o potencial de síntese da parametrização *Grasshopper*®, onde é possível associar diferentes algoritmos de produção de diferentes partes do projeto de arquitetura e engenharia em um único sistema generativo.

A integração *CAE-CAD-CAM* (*CAEDM*) é algo almejável, pois para se fabricar as peças corretamente é necessário que elas estejam calculadas e, assim, compatibilizadas para a fabricação digital. Desta forma, pode ser uma resposta ao

problema da automação da construção civil, na medida em que qualifica a arquitetura diante da produção industrial, por meio do exercício de reconhecimento das etapas de produção pelo projeto paramétrico. O foco na estrutura foi uma estratégia que possibilitou a independência do sistema de ocupação, o que em termos de sustentabilidade é algo positivo, pois libera o habitante das restrições que um sistema fechado pode ter, tais como *WikiHouse*. Concentrou-se no âmbito estrutural, porém, identifica-se que podem ser considerados outros estudos específicos dos sistemas prediais como hidráulico, elétrico, esgotamento, e, também, a compatibilização geral de todos eles em conjunto.

A modelagem da informação para a construção (*BIM*) também foi integrada, o que possibilitou o cálculo de quantitativos materiais do projeto independente da sua forma final, possibilitando a personalização de uma solução habitacional. Bem como o planilhamento automatizado, por meio da identificação, planificação e *nesting* de todos os vetores para corte. Tais vetores serviriam para fabricação digital em todas as escalas, desde a maquete até a construção real e, uma vez as peças cortadas, poderiam ser montadas por encaixes simples seguindo a ordem da identificação, por um processo de autoconstrução. Com a maquete palpável foi possível simular a fabricação digital real, uma vez que a máquina laser *cutter* escolhida desempenha um processo de fabricação semelhante à máquina CNC de corte à plasma de chapas metálicas.

Ressalta-se que, a partir do roteiro finalizado, foi possível visualizar um instrumento didático para ensino das disciplinas de cálculo estrutural, uma vez que o modelo algorítmico foi interligado por um processo de pré-dimensionamento da estrutura. Com isso, esse instrumento tornou visível as diversas mudanças dos perfis da estrutura metálica proposta no último experimento, para cada transformação das distâncias entre os eixos estruturais, que incorre em mudança nas supostas cargas que incidiriam na laje e que seriam distribuídas pelas vigas e pilares. O instrumento mencionado facilitou a visualização da dinâmica estrutural, o que se considera uma contribuição desta etapa da pesquisa, tendo em vista que outros processos de modelagem para projeto de arquitetura não apresentam essa ferramenta.

O principal foi revelar ao arquiteto a capacidade da produção digital na resolução de problemas de projeto, por meio da roteirização *CAEDM* e incluindo os parâmetros industriais, sem desconsiderar o arcabouço teórico, técnico e artístico,

comum à prática arquitetônica. As tecnologias são vazias de significado e precisam ser utilizadas racionalmente, ou então arrisca-se o uso pelo uso, aquilo que Benjamin (2012) apresentou como o perigo da reprodutibilidade técnica. Desta forma, pode se afirmar que foi realizado um método de roteirização da produção digital em arquitetura visando a prática profissional e considerando o papel da produção artesanal no projeto arquitetônico de um sistema estrutural para um modelo de casa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, Christopher. **Notes on the synthesis of form**. Londres: Oxford University Press, 1964.

AUGUGLIARO, Federico [et al.]. Architectural fabrication of tensile structures with flying machines. In: **Green design: materials and manufacturing processes**, p. 513-518, 2013.

BALMOND, Cecil. **Informal**. C. Bensing (ed.) com J. Smith. Munique, Berlim, Londres e Nova York: Prestel, 2007.

BANHAM, Reyner. **Theory and design in the first machine age**. Londres: The Architectural Press, 1960.

BENJAMIN, Walter. A obra de arte na era de sua reprodutibilidade técnica. In: **Magia e técnica, arte e política: ensaios sobre literatura e história da cultura**. Tradução: Sérgio Paulo Rouanet. São Paulo: Brasiliense, 2012.

BERTHO, Beatriz Carra [et al.]. A prototipagem rápida: do processo de projeto ao canteiro de obras. In: D. C. C. K. Kowaltowski, D. C. Moreira, J. R. D. Petreche, M. M. Fabricio (eds.). **O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia** (p. 443-454). São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

BONWETSCH, Tobias [et al.]. **The informed wall: applying additive digital fabrication techniques on architecture**. Louisville: ACADIA Proceedings, 2006.

BONWETSCH, Tobias [et al.]. **Digitally fabricating tilted holes: experiences in tooling and teaching design**. Frankfurt: eCAADe Proceedings, 2007.

BORRELL, Jerry. Solid Modeling. In: E. Teicholz (ed.). **CAD/CAM Handbook**. Cambridge: MIT Press, 1985.

BRANCO, Bruna [et al.]. **Fabricação digital aplicada à habitação de caráter emergencial: um estudo sobre a adaptação de WikiHouses ao contexto ambiental brasileiro**. Concepción: SIGraDI Proceedings, 2017.

BRASIL, Alexander Lopes de Aquino; FRANCO, Juarez Moara Santos. **Customizing mass housing in Brazil: introduction to an integrated system**. Porto: eCAADe + SIGraDi Proceedings, 2019.

BRUGNARO, Giulio [et al.]. **Robotic softness: an adaptive robotic fabrication process for woven structures**. Ann Arbor: ACADIA Proceedings, 2016.

BULLOCK, Nicholas; DICKENS, Peter; STEADMAN, Philip. The use of models in planning and the architectural design process. In: L. Martin, L. March (eds.). **Urban space and structures**. Cambridge: Cambridge University Press, 1972.

BURRY, Jane; BURRY, Mark. **The new mathematics of architecture**. Nova York: Thames & Hudson, 2010.

BURRY, Mark. **Scripting cultures: architectural design and programming**. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

CACHE, Bernard. **Earth moves: the furnishing of territories**. Tradução do francês: Anne Boyman. M. Speaks (ed.). Cambridge e Londres: MIT Press, 1995.

CALDWELL, Glenda Amayo; GUARALDA, Mirko. Blurring the physical boundaries of the city: Media architecture and urban informatics for community engagement. In: G. A. Caldwell, C. H. Smith, E. M. Clift (eds.). **Digital futures and the city of today: new technologies and physical spaces**. Bristol: Intellect Ltd, 2016.

CAMPOS, Paulo Eduardo Fonseca de [org.]. **Microconcreto de alto desempenho: la tecnologia del MicroCAD aplicada em la construcción del hábitat social**. São Paulo: Mandarim, 2013.

CAO, Lilly. **The evolution of bricklaying robots: challenging the rules of traditional construction**. In: ArchDaily, 2019. Disponível em: <https://www.archdaily.com/928440/the-evolution-of-bricklaying-robots-changing-the-rules-of-traditional-construction>

CARPO, Mario. **The alphabet and the algorithm**. Cambridge: MIT Press, 2011.

COOK, Peter (ed.). **Archigram**. Nova York: Princeton Architectural Press, 1999.

DI RAIMO, Antonino. **François Roche: heretical machinism and living architectures of New-Territories.com**. Tradução para o inglês: Kalina Yamboliev. Roma: EdilStampa, 2014.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem**. São Paulo: Zigurate Editora, 1997.

DUARTE, José Pinto. A discursive grammar for customizing mass housing: the case of Siza's houses at Malagueira. In: **Automation in construction**, 12(2), p. 265-275, 2005.

EASTMAN, Chuck [et al.]. **Manual BIM: um guia de modelagem da informação para construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores**. Tradução: Cervantes Gonçalves Ayres Filho [et al.]. Porto Alegre: Bookman, 2014.

EISENMAN, Peter. **The formal basis of modern architecture**. 1963. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Cambridge University, Cambridge.

FELBRICH, Benjamin [et al.]. **Multi-machine fabrication**: an integrative design process utilising an autonomous UAV and industrial robots for the fabrication of long-span composite structures. Cambridge: ACADIA Proceedings, 2017.

FRAILE, Marcelo. **El nuevo paradigma contemporáneo**: del diseño paramétrico a la morfogénesis digital. 2014. Disponível em: <http://ariel-amadio.com/docencia/wp-content/uploads/2013/08/El-nuevo-paradigma-contempor%C3%A1neo.-Del-dise%C3%B1o-param%C3%A9trico-a-la-morfog%C3%A9nesis-digital-Marcelo-Fraile-.pdf>

FRAMPTON, Kenneth. **História crítica da arquitetura moderna**. Tradução: Jefferson Luiz Camargo. São Paulo: Martins Fontes, 1997.

FRÚGOLI JR., Heitor. **São Paulo**: espaços públicos e interação social. São Paulo: Marco Zero, 1995.

GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. Towards a digital materiality. In: B. Kolarevic, K. Klinger (eds.). **Manufacturing material effects**: rethinking design and making architecture. Nova York: Routledge, 2008.

_____. **The robotic touch**: how robots change architecture. Zurique: Park Books, 2014.

GREGH, Eleanor. The Dom-ino Idea. In: **Oppositions 15/16**: a journal for ideas and criticism in architecture. Cambridge: MIT Press, 1979.

HACK, Norman [et al.]. **Mesh mould**: differentiation for enhanced performance. Kyoto: CAADRIA Proceedings, 2014.

HALABI, Marwan. The Sagrada Família: the starting point of CAD/CAM in architecture. In: **Scientific Cooperations Journal of Civil Engineering and Architecture**, Vol. 02, N. 01, p. 12-19, 2016.

HEIDEGGER, Martin. **Nietzsche, Volume I**. Tradução: Marco Antônio Casanova. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2010.

HELM, Volker [et al.]. **In-situ robotic construction**: extending the digital fabrication chain in architecture. São Francisco: ACADIA Proceedings, 2012.

HENSEL, Michael; MENGES, Achim. Versatility and vssicitude: an introduction to performance in morpho-ecological design. In: M. Hensel, A. Menges (eds.). **Versatility and vssicitude, architectural design**, Vol. 78, N. 02, p. 6-11, 2008.

HOU, Jeffrey (ed.). **Insurgent public spaces**: guerrilla urbanism and the remaking of contemporary cities. Nova York: Routledge, 2010.

IZAR, Gabriela. **Diagramática**: descrição e criação das formas na arquitetura seriada de Peter Eisenman. 2015. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

KALAY, Yehuda E. **The future of CAAD**: from computer-aided design to computer-aided collaboration. Atlanta: CAAD Futures Proceedings, 1999.

KHOSHNEVIS, Behrokh. Automated construction by contour crafting: related robotics and information technologies. In: **Automation in Construction**, 13 (1). Amsterdã: Elsevier, 2004.

KNIPPERS, Jan; SPECK, Thomas. Design and construction principles in nature and architecture. In: **Bioinspiration & Biomimetics**, vol. 7, p. 1-10, 2012.

KOLAREVIC, Branko. **Digital fabrication**: manufacturing architecture in the information age. Buffalo: ACADIA Proceedings, 2001.

_____. **Architecture in the digital age**: design and manufacturing. Nova York e Londres: Taylor & Francis, 2003.

KRAUSS, Rosalind. A escultura no campo ampliado. Tradução: Elizabeth Carbone Baez. In: **Gávea**, n. 1. Rio de Janeiro: PUC, 1984.

KRIEG, Oliver David; MENGES, Achim. **Potentials of robotic fabrication in wood construction**: elastically bent timber sheets with robotically fabricated finger joints. Cambridge, Ontario: ACADIA Proceedings, 2013.

KRIEG, Oliver David [et al.]. **Performative architectural morphology**: robotically manufactured biomimetic finger-joined plate structures. Ljubljana: eCAADe Proceedings, 2011.

KRIEG, Oliver David [et al.]. **Computational design of robotically manufactured plate structures based on biomimetic design principles derived from Clypeasteroidea**. Praga: eCAADe Proceedings, 2012.

KRÜGER, Mário. **Leslie Martin e a Escola de Cambridge**. Coimbra: Editorial do Departamento de Arquitectura da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2005.

LACROIX, Igor [et al.]. **Estudo de detalhamento estrutural da Catedral de Palmas – TO, Brasil**. Buenos Aires: SIGraDi Proceedings, 2016. Disponível em: http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2016_636. Acesso em: 19 fev. 2020.

LACROIX, Igor. **Brasília e a industrialização brasileira. Circulação, comunicação e indústria:** representações no Plano Piloto. 2013. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília.

_____. **Guerrilla urbanism and digital production:** a study of temporary occupation of public spaces. São Carlos: SIGraDi Proceedings, 2018. Disponível em: http://papers.cuminCAD.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2018_1600. Acesso em: 19 fev. 2020.

LADURNER, Georg [et al.]. **Interactive form-finding for biomimetic fibre structures:** development of a computational design tool and physical fabrication technique based on the biological structure of the lichen. Praga: eCAADe Proceedings, 2012.

LANDIM, Gabriele [et al.]. **Architectural optimization and open source development: nesting and genetic algorithms.** Cambridge: ACADIA Proceedings, 2017.

LANGE, Christian. **Elements | robotics interventions II.** Roma: eCAADe Proceedings, 2017.

LATORRACA, Giancarlo (org.). **João Filgueiras Lima, Lelé.** São Paulo: Instituto Lina Bo Bardi e P.M. Bardi, 1999.

LIM, Jason [et al.]. **Robotic metal aggregations:** an integral approach to designing robotic fabricated lightweight metal structures. Kyoto: CAADRIA Proceedings, 2014.

LIM, Jason; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. **A software environment for designing through robotic fabrication:** developing a graphical programming toolkit for the digital design and scaled robotic fabrication. Singapura: CAADRIA Proceedings, 2013.

LIMA, João Filgueiras. **O que é ser arquiteto:** memórias profissionais de Lelé (João Filgueiras Lima) em depoimento a Cynara Menezes. Rio de Janeiro: Record, 2004.

LIMA, João Filgueiras. Um Beijódromo para Darcy. In: Fundação Darcy Ribeiro. **Beijódromo:** Memorial Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro: Fundação Darcy Ribeiro e Editora Universidade de Brasília, 2011.

LLORET KRISTENSEN, Ena [et al.]. **Complex concrete constructions:** merging existing castin techniques with digital fabrication. Singapura: CAADRIA Proceedings, 2013.

LOGAN, Daryl L. **A first course in the finite element method.** Stamford: Cengage Learning, 2011.

LYNN, Greg. **Architecture for an Embriologic Housing**. Princeton: Princeton Architectural Press, 2002.

MARTIN, Leslie; MARCH, Lionel (eds.). **Urban space and structures**. Cambridge: Cambridge University Press, 1972.

MARTINS, Pedro; SOUSA, José Pedro. **Digital fabrication technology in concrete architecture**. Newcastle: eCAADe Proceedings, 2014.

MELENBRINK, Nathan [et al.]. **Towards force-aware robot collectives for on-site construction**. Cambridge: ACADIA Proceedings, 2017.

MENGES, Achim. **Integrative design computation: integrating material behavior and robotic manufacturing processes in computational design for performative wood constructions**. Calgary e Banff: ACADIA Proceedings, 2011.

MERLEAU-PONTY, Maurice. **Sens et non-sens**. Paris: Les Éditions Nagel, 1966.

MITCHELL, William John. **Computer-aided architectural design**. Nova York: Van Nostrand Reinhold Company, 1977.

_____. Architecture, engineering and construction. In: E. Teicholz (ed.). **CAD/CAM Handbook**. Cambridge: MIT Press, 1985.

_____. Roll over Euclid: how Frank Gehry designs and builds. In: J. F. Ragheb (ed.). **Frank Gehry, architect**. Nova York: Guggenheim Museum Publications, 2001.

MORORÓ, Mayra Soares de Mesquita [et al.]. **Arquitetura paramétrica em habitação de interesse social: uma análise da produção científica no Brasil e no exterior**. Fortaleza: SIGraDi Proceedings, 2012.

NAN, Cristina. **A new machinecraft: architectural robots**. Daegu: CAADRIA Proceedings, 2015.

NARDELLI, Eduardo Sampaio; PEREIRA, Vinicius Juliani. **Autoconstrução, fabricação digital e a construção autônoma**. Concepción: SIGraDI Proceedings, 2017.

NARDELLI, Eduardo Sampaio. **Fabricação digital na produção de habitação de interesse social no Brasil**. Montevideu: SIGraDi Proceedings, 2014.

NEGROPONTE, Nicholas. **The architecture machine: toward a more human environment**. Cambridge: The MIT Press, 1970.

OLIVEIRA, Marina Rodrigues de; FABRICIO, Márcio Minto. Projeto paramétrico e prototipagem rápida: casos em instituições internacionais. In: D. C. C. K. Kowaltowski, D. C. Moreira, J. R. D. Petreche, M. M. Fabricio (eds.). **O processo de projeto em arquitetura**: da teoria à tecnologia (p. 455-469). São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

OOSTERHUIS, Kas [et al.]. **File to factory and real-time behavior in ONL-Architecture**. Cambridge e Toronto: ACADIA Proceedings, 2004.

OOSTERHUIS, Kas. Simply complex: toward a new kind of building. In: **Frontiers of architectural research**, 1(4), 411-420, 2012.

ORR, Joel. Tools: hardware and software. In: E. Teicholz (ed.). **CAD/CAM Handbook**. Cambridge: MIT Press, 1985.

OXMAN, Neri [et al.]. **Biological computation for digital design and fabrication**: a biologically-informed finite element approach to structural performance and material optimization of robotically deposited fibre structures. Delft: eCAADe Proceedings, 2013.

OXMAN, Neri [et al.]. Silk Pavilion: a case study in fibre-based digital fabrication. In: F. Gramazio, M. Kohler, S. Langenberg (eds.). **Fabricate**. Zurique: gta Verlag, 2014.

PAIO, Alexandra [et al.]. **Emerg.cities4all**: towards a shape grammar based computational system tool for generating a sustainable and integrated urban design. Ljubljana: eCAADe Proceedings, 2011.

PALLASMAA, Juhani. **Os olhos da pele**: a arquitetura e os sentidos. Tradução: Alexandre Salvaterra. Porto Alegre: Bookman, 2011.

PEIXOTO, Nelson Brissac. **Paisagens urbanas**. São Paulo: Editora SENAC, 1996.

_____. **Intervenções urbanas**: Arte Cidade. São Paulo: Editora SENAC, 2012.

PETERS, Scott; BELDEN, Robert. SAM, the robotic bricklayer. In: **SMART**: Dynamics of masonry, Vol. 01, N. 04, p. 10-14, 2014.

PHILLIPS, Stephen J. **Elastic architecture**: Frederick Kiesler and design research in the first age of robotic culture. Cambridge: MIT Press, 2017.

PINHEIRO, Haroldo. Beijódromo: arte e tecnologia. In: Fundação Darcy Ribeiro. **Beijódromo**: Memorial Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro: Fundação Darcy Ribeiro e Editora Universidade de Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/projetos/12.133/4186>. Acesso em: 16 fev. 2020.

PORTO, Cláudia Estrela. *Beijódromo: a nova morada de Darcy Ribeiro*. In: Fundação Darcy Ribeiro. **Beijódromo: Memorial Darcy Ribeiro**. Rio de Janeiro: Fundação Darcy Ribeiro e Editora Universidade de Brasília, 2011.

POTTMANN, Helmut [et al.]. **Architectural geometry**. Exton: Bentley Institute Press, 2007.

PUPO, Regiane; CELANI, Maria Gabriela Caffarena. Prototipagem rápida e fabricação digital na arquitetura: fundamentação e formação. In: D. C. C. K. Kowaltowski, D. C. Moreira, J. R. D. Petreche, M. M. Fabricio (eds.). **O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia** (p. 470-485). São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

R&SIE(N); DURANDIN, Benoit. **I've heard about (a flat, fat, growing urban experiment)**. Paris: Paris-Musées, 2005.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. **A concepção estrutural e a arquitetura**. São Paulo: Zigurate Editora, 2000.

_____. **Bases para o projeto estrutural na arquitetura**. São Paulo: Zigurate Editora, 2007.

REEVE JR., Ronald C. Robotics. In: E. Teicholz (ed.). **CAD/CAM Handbook**. Cambridge: MIT Press, 1985.

RISÉRIO, Antonio. Um mestre da precisão e da delicadeza estética e social. In: Risselada, Max; Latorraca, Giancarlo (orgs.). **A arquitetura de Lelé: fábrica e invenção**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo: Museu da Casa Brasileira, 2010.

_____. Entre arquitetura e pensamento social. In: Fundação Darcy Ribeiro. **Beijódromo: Memorial Darcy Ribeiro**. Rio de Janeiro: Fundação Darcy Ribeiro e Editora Universidade de Brasília, 2011.

SÃO PAULO (Estado). Decreto n.º 55.045, de 16 de abril de 2014. Regulamenta a instalação e o uso de extensão temporária de passeio público, denominada "*parklet*". In: **Diário Oficial do Município de São Paulo**, São Paulo, 2014.

SCHLEE, Andrey Rosenthal. O Lelé na UnB (ou o Lelé da UnB). In: C. E. Porto (org.). **Olhares: visões sobre a obra de João Filgueiras Lima**. Brasília: Universidade de Brasília, 2010.

SCHUMACHER, Patrik. **The autopoiesis of architecture, Volume 1: a new framework for architecture**. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

_____. **The autopoiesis of architecture, Volume 2: a new agenda for architecture**. Chichester: John Wiley & Sons, 2012.

SCHWAB, Klaus. **The fourth industrial revolution**. Londres: Penguin Books, 2017.

SCHWINN, Tobias [et al.]. **Machinic morphospaces**: biomimetic design strategies for the computational exploration of robot constraint spaces for wood fabrication. São Francisco: ACADIA Proceedings, 2012a.

SCHWINN, Tobias [et al.]. Robotically fabricated wood plate morphologies. In: S. Brell-Çokcan, J. Braumann (eds.). **Robotic fabrication in architecture, art and design**, p. 48-61, 2012b.

SCHWINN, Tobias [et al.]. **Behavioral strategies**: synthesizing design computation and robotic fabrication of lightweight timber plate structures. Los Angeles: ACADIA Proceedings, 2014.

SCHWINN, Tobias [et al.]. **Robotic sewing**: a textile approach towards the computational design and fabrication of lightweight timber shells. Ann Arbor: ACADIA Proceedings, 2016.

SHUSTERMAN, Richard. Transformando a arte e a filosofia. Tradução: Neusa da Silva Matte e Maria Ozomar R. Squeff. In: M. Zielinsky (org.). **Fronteiras**: arte, críticas e outros ensaios. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2003.

SILVA JR., Félix Alves da. **O uso de algoritmos e de sistemas paramétricos na concepção arquitetônica de pequenas residências**. 2011. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília.

_____. **O uso de sistemas generativos como instrumento de desenho urbano sustentável**. 2016. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília.

SILVA, Lilian [et al.]. **Integrating parametric modeling with BIM through generative programming for the production of NURBS surfaces and structures**. Wellington: CAADRIA Proceedings, 2019.

SILVA, Neander Furtado [et al.]. **A indústria da construção civil está pronta para a fabricação digital e a customização em massa? Uma pesquisa sobre um caso brasileiro**. São Paulo: SIGraDi Proceedings, 2009.

SILVA, Nuno António do Sacramento Penacho Pereira da. **A construção robótica em arquitetura**. 2017. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Escola de Tecnologias e Arquitetura, ISCTE-Instituto Universitário de Lisboa, Lisboa.

SOUSA JR., José Geraldo. Um memorial projetado para o futuro. In: Fundação Darcy Ribeiro. **Beijódromo**: Memorial Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro: Fundação Darcy Ribeiro e Editora Universidade de Brasília, 2011.

SOUSA, José Pedro; DUARTE, José Pinto. **Digital desires, material realities: perceiving the technological gap.** Lisboa: eCAADe Proceedings, 2005.

SOUSA, José Pedro; MARTINS, Pedro Filipe. **The robotic production of the GRC Panels in the CorkCrete Arch Project:** a stratified strategy for the fabrication of customized molds. Oulu: eCAADe Proceedings, 2016.

SOUSA, José Pedro; XAVIER, João Pedro. **A fabricação robótica no ensino de arquitetura:** uma experiência sobre o projecto e construção de estruturas em tijolo. Florianópolis: SIGraDi Proceedings, 2015.

SOUSA, José Pedro [et al.]. **Between manual and robotic approaches to brick construction in architecture:** expanding the craft of manual bricklaying with the help of video projection techniques. Viena: eCAADe Proceedings, 2015a.

SOUSA, José Pedro [et al.]. **Robotic fabrication with cork:** emerging opportunities in architecture and building construction. Cincinnati: ACADIA Proceedings, 2015b.

SOUSA, José Pedro [et al.]. **The CorkCrete arch project:** the digital design and robotic fabrication of a novel building system made out of cork and glass-fibre reinforced concrete. Melbourne: CAADRIA Proceedings, 2016.

SOUSA, José Pedro (ed.). **Robotic technologies for non-standard design and construction in architecture.** Porto: Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto, 2015.

SOUSA, José Pedro. **From digital to material:** rethinking cork in architecture through the use of CAD/CAM technologies. 2010. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

STAKE, Robert E. Case studies. In: N. K. Denzin, Y. S. Lincoln (eds.). **Strategies of qualitative inquiry.** Thousand Oaks: SAGE Publications, 2003.

TEICHOLZ, Eric (ed.). **CAD/CAM Handbook.** Cambridge: MIT Press, 1985.

TERZIDIS, Kostas. **Algorithmic architecture.** Oxford: Architectural Press, 2006.

TIZZARD, Andrew. **An introduction to computer-aided engineering.** Berkshire: McGraw-Hill Book Company Europe, 1994.

TRAMONTANO, Marcelo. Unidades experimentais de habitação. In: **Projeto Design,** ed. 243. São Paulo: Arco Editorial, 2000.

_____. **When research and teaching connect: parametric design, digital fabrication and architectural design.** Florianópolis: SIGraDi Proceedings, 2015.

VARELA, Pedro de Azambuja; SOUSA, José Pedro. **Digital expansion on stereotomy**: a semantic classification. Porto: eCAADe + SIGraDi Proceedings, 2019.

_____. **Digital flow in stone heritage buildings**: the nasoni keystone experiment. Viena: eCAADe Proceedings, 2015.

_____. **Revising stereotomy through digital technology**. Oulu: eCAADe Proceedings, 2016.

VASEY, Lauren [et al.]. **Behavioral design and adaptive robotic fabrication of a fiber composite compression shell with pneumatic formwork**. Cincinnati: ACADIA Proceedings, 2015.

VASEY, Lauren [et al.]. **Collaborative construction**: human and robot collaboration enabling the fabrication and assembly of a filament-wound structure. Ann Arbor: ACADIA Proceedings, 2016.

VERGARA PERUCICH, Francisco; BOANO, Camillo. Bajo escasez ¿Media casa basta? Reflexiones sobre el Pritzker de Alejandro Aravena. In: **Revista de Arquitectura** 21 (31). Santiago: Universidad de Chile, 2016.

WEIGELE, Jakob [et al.]. **Fibrous morphologies**: integrative design and fabrication of fibre-reinforced structures in architecture using robotic filament winding. Delft: eCAADe Proceedings, 2013.

WILLMANN, Jan [et al.]. Aerial robotic construction towards a new field of architectural research. In: **International Journal of Architectural Computing – IJAC**, p. 439-459, 2012.

WOODBURY, Robert. **Elements of parametric design**. Londres e Nova York: Routledge, 2010.

YAMANA, Daniella Naomi [et al.]. **Calçadas drenantes**: intervenções físicas com desenvolvimento social. Concepción: SIGraDi Proceedings, 2017.

YUAN, Philip F.; MENGES, Achim; LEACH, Neil (eds.). **Digital fabrication**. Shanghai: Tongji University Press, 2017.

YUNIS, Leyla [et al.]. **Bio-inspired and fabrication-informed design strategies for modular fibrous structures in architecture**. Newcastle: eCAADe Proceedings, 2014.

ZEVI, Bruno. **Saber ver a arquitetura**. Tradução: Maria Isabel Gaspar e Gaëtan Martins de Oliveira. São Paulo: Martins Fontes, 1996.

ANEXOS

Entrevista com Vicente Muñoz

Entrevista concedida em 29 de agosto de 2017, na fábrica da GRAVIA do Setor de Indústrias e Abastecimento – SIA, em Brasília – DF.

Igor Lacroix: Eu, em conjunto com o Professor Neander, que você deve ter conhecido, junto com Edimilson, da Universidade de Brasília – UnB, estamos fazendo uma pesquisa sobre o trabalho do Lelé, especificamente o Beijódromo.

Vicente Muñoz: Sim.

IL: A nossa intenção é fazer um artigo para poder tentar qualificar o Lelé, além de outras qualidades que ele tem, e que você deve saber muito mais do que eu.

VM: Sei.

IL: Mas qualificar ele como um arquiteto que produz dentro de uma metodologia, que é essa que a gente chama de fabricação digital.

VM: Certo.

IL: Que é a coisa de usar o computador para fazer componentes e ter um controle computadorizado de corte etc. E a gente tem esse interesse pelo Beijódromo especificamente, porque é uma obra que está dentro da UnB.

VM: Isso.

IL: Próxima do departamento de arquitetura. Está ali bem próximo da gente, e a gente tem um acesso, é um projeto que a gente sabe que foi todo executado aqui por vocês. A gente teve uma visita no chão de fábrica, lá em Taguatinga, junto com o Ivaldo.

VM: Isso, isso.

IL: Ele falou que na época virou noites fazendo o trabalho.

VM: É porque muitas peças tinham prazo.

IL: Sim.

VM: Então, tinha uma sequência de entrega.

IL: Sei.

VM: Então, aquelas peças que ficaram lá atrasadas pela entrega da GRAVIA ou pela sequência, acabavam necessitando na obra daquele elemento. Tinha a necessidade de fazer algum esforço da GRAVIA para que pudesse entregar.

IL: Ou seja, nem tudo foi planejado dentro do escritório? Ou todos os detalhes saíram do escritório?

VM: Não, você diz pelo Habitat? Pelo Dr. Lelé?

IL: Isso.

VM: Todos.

IL: Todo detalhamento do projeto?

VM: A GRAVIA não detalhou nada. Como é que funcionou? A GRAVIA só forneceu a matéria-prima.

IL: Sei.

VM: A matéria-prima. As planilhas todas, o planilhamento de todas as peças foi feito pela equipe do Dr. Lelé.

IL: Sim.

VM: Então, a GRAVIA recebeu tudo o que era para fazer.

IL: Sei.

VM: A GRAVIA não produziu nada, não produziu estrutura, não produziu esquadria, nenhum elemento metálico. A GRAVIA só forneceu a matéria-prima que o Dr. Lelé tinha necessidade de receber.

IL: Entendi.

VM: E era feita a fabricação, eu vou considerar a fabricação, foi feita no próprio canteiro da obra.

IL: É mesmo?

VM: Foi.

IL: Que coisa! Solda essas coisas?

VM: Tudo, ela não dá um pingão de solda.

IL: Sei.

VM: Então, eu, na época, fazia parte da equipe do Dr. Lelé.

IL: Dentro do escritório?

VM: Dentro do escritório, em Salvador. Depois o projeto foi digitalizado.

IL: Sim.

VM: E veio para Brasília e a gente usava o projeto para fazer a liberação, planilhar, para GRAVIA poder fornecer a matéria-prima.

IL: Entendi.

VM: Então, foi feito no escritório e no canteiro de obra, também.

IL: Ok.

VM: De lá foi planilhado, peça por peça, o que a GRAVIA iria executar.

IL: Entendi. E você que coordenava essa parte?

VM: Não, tinham várias pessoas.

IL: Certo.

VM: Ele praticamente já veio pronto de Salvador.

IL: É mesmo?

VM: É, todas as etapas já foram elaboradas pelo Dr. Lelé e passado para uma equipe de arquitetos do Instituto.

IL: Sei. CEPLAN? Era da UnB?

VM: Não, não. O Instituto do próprio Dr. Lelé.

IL: Ah, tá, entendi.

VM: Instituto Brasileiro da Tecnologia do Habitat – IBTH.

IL: Entendi.

VM: Era um Instituto que deveria ter mais ou menos uns doze arquitetos. Incluindo da parte mecânica, também. O elevador, por exemplo, foi construído por ele.

IL: Que interessante!

VM: Verdade! Tem da parte elétrica.

IL: Sim.

VM: De instalações elétricas e sanitárias, hidráulicas.

IL: A parte de engenharia, quem é que se responsabilizou? Você se lembra?

VM: Como assim?

IL: Se existia um engenheiro dentro desse Instituto.

VM: No canteiro de obra?

IL: Sim.

VM: Era a arquiteta Adriana.

IL: Ela que tomava conta?

VM: Ela acompanhou a montagem toda.

IL: Por isso que você até falou para eu entrar em contato com ela, não é?

VM: Isso.

IL: Eu consegui o contato dela. O Professor Neander entrou em contato com uma outra professora, que é a Cláudia Estrela, que também trabalhou com o Dr. Lelé.

VM: Foi, mas ela não participou da obra.

IL: Da obra, não.

VM: Ela visitava de vez em quando a gente lá.

IL: Entendi. Ela conseguiu compartilhar com a gente o *e-mail* da Adriana. Eu mandei um *e-mail* para ela e ela se dispôs, mas não é garantido a vinda dela.

VM: Sei.

IL: E ela disse que viria agora no início de setembro, então, provavelmente, a gente vai conseguir conversar com ela.

VM: Na parte do canteiro de obras, que eu fiquei desde a fundação até o término, foi na parte de serralheria, de metalurgia e da montagem de peças.

IL: Sei. Ali, todo o projeto é de estrutura metálica, não é?

VM: Praticamente tudo metálico.

IL: Os *brises*, a cobertura.

VM: As esquadrias e tem uns *brises* na parte interna que é para redução da radiação solar.

IL: E, também, os perfis que foram usados na estrutura metálica, não é?

VM: Sim.

IL: São perfis curvos, certo?

VM: Isso.

IL: Como eles foram executados?

VM: O que é reto você utilizava uma viga padrão.

IL: Sei.

VM: E o que era curvo, você montava a viga em curva.

IL: Ok.

VM: E tem a alma e tem os banzos de uma viga "I", por exemplo.

IL: Sim.

VM: Então, se calandrava na forma que o projeto solicitava. Então, foi feito um platô enorme lá no canteiro de obra.

IL: Sei.

VM: No qual foi desenhado através da coordenada do próprio projeto.

IL: Entendi.

VM: E foi feita a montagem, em cima de um gabarito desenhado em cima desse platô.

IL: Sei.

VM: Aí ele tinha calandra.

IL: Dentro do canteiro?

VM: Dentro do canteiro.

IL: E o corte da alma curva?

VM: Aí foi feito na GRAVIA, a partir do desenho em *CAD*. Você envia o arquivo e a máquina lê em *CAD*. Daí ela corta na forma que você deseja.

IL: Que é o que se executa em Taguatinga?

VM: Isso, é executado lá em Taguatinga.

IL: Essa fábrica aqui não tem esse tipo de maquinário?

VM: Não, não tem espaço para isso.

IL: Entendi. E na época você tinha já essa ponte entre a GRAVIA e o escritório do Lelé? Como que funcionava essa parte?

VM: Não, eu era funcionário do Instituto.

IL: Entendi.

VM: E a GRAVIA foi o fornecedor.

IL: Entendi.

VM: Eles fabricavam aquilo que a gente solicitava.

IL: Sei.

VM: A gente já fornecia o desenho para eles e eles não desenvolveram nada.

IL: Isso é muito interessante.

VM: Já pegou o desenho formado, ou é um perfil, ou é uma viga, ou é para calandrar, ou é para cortar no plasma.

IL: Entendi.

VM: Foi feito dessa maneira.

IL: Vários componentes, às vezes mandava para uma fábrica, às vezes era feito *in loco*.

VM: A GRAVIA não sabia nem qual era a finalidade daquele elemento metálico.

IL: Entendi.

VM: Simplesmente eles já recebiam todo o detalhamento do projeto, perfil por perfil.

IL: Sei.

VM: O quebra-cabeça foi feito todo lá na obra.

IL: O professor Neander também chegou a comentar comigo uma coisa que você falou para ele, em que toda essa parte do corte da alma da viga foi feito na máquina à plasma, certo?

VM: Isso.

IL: Quem montou o esquema para corte foram vocês, também?

VM: Foi o Instituto.

IL: Foi uma parte manual?

VM: Não, não, não.

IL: Não? Como foi?

VM: Em *CAD* você secciona o comprimento que você precisa.

IL: Entendi.

VM: Nada foi feito manual.

IL: Entendi.

VM: Tudo foi em *CAD*.

IL: Mas vamos imaginar que tem uma barra e serão fatiados determinados perfis...

VM: Aí você vai ter um desenho em *CAD*, porque você...

IL: Vocês é que movem ali as entidades para elas ficarem melhor posicionadas.

VM: Exatamente, porque você tem que aproveitar a chapa padrão.

IL: Sei.

VM: Você tem as dimensões e dentro daquela dimensão você vai retalhar as peças naquele documento ou largura das chapas que já existem.

IL: Sim.

VM: Então, o intercâmbio com a GRAVIA, na época, foi para saber quais dimensões têm essas chapas.

IL: Sim.

VM: Para você adequar quantas peças vão sair.

IL: De uma vez só?

VM: Depois você vai pegar as peças e emendar umas nas outras.

IL: Entendi.

VM: Mas nada foi feito...

IL: Nada à mão, não é?

VM: Não. Ele deve estar se confundindo com uma outra história.

IL: Qual história?

VM: Uma história de um projeto do Oscar Niemeyer.

IL: Ok.

VM: Que foi feito à mão e o desenho dele foi passado para uma escala e ele exigiu que todas as curvas que ele fez à mão fossem executadas daquela maneira. Essa é uma outra história.

IL: É um outro projeto.

VM: Um croqui que ele desenhou à mão. Ele exigiu que não tivesse artifício nenhum para execução. O que engrossou, o que afinou, ele quis da mesma maneira que o desenho. Outra história. No Beijódromo nada foi empírico.

IL: Sim.

VM: Nada.

IL: Foi tudo bem planejado, não é? Um processo todo de pré-fabricação.

VM: Quando passou para GRAVIA, ela já sabia o que tinha que executar, cortar, aproveitar os materiais.

IL: Sei.

VM: Porque até os retalhos voltaram para o Instituto.

IL: Entendi, até o que seria desperdiçado voltou para lá.

VM: Voltou para lá.

IL: Lá em Salvador?

VM: Não, aqui no canteiro de obra.

IL: Ok, no canteiro.

VM: Tudo que sobrou de retalho ficou no canteiro de obra.

IL: Sei. Esse Instituto ainda funciona? Ele ainda está ativo?

VM: Não sei.

IL: Não tem mais registro?

VM: Acho que não. Com a falta do Dr. Lelé acho que a Adriana não quis levar adiante, não tem o porquê.

IL: E o tempo que se gastou nesse projeto? Foi mais de ano? Quanto tempo levou?

VM: Não foi muito tempo, não. Ele fez dentro de outro projeto.

IL: Sei.

VM: Ele tinha um projeto maior e ele foi fazendo.

IL: Entendi.

VM: Juntamente. Aproveitando o tempo de cada um.

IL: Entendi.

VM: Não foi especificamente para esse projeto.

IL: Sei.

VM: Vamos dizer, todo mundo estava focado para fazer esse projeto. Ele foi fazendo dentro de um outro projeto muito maior.

IL: Entendi. É como se ele tivesse pegado uma parte do projeto maior e conseguisse fazer uma menor escala.

VM: Ele introduziu a execução desse projeto e foi saindo, no tempo que ele planejou que saísse.

IL: E quanto tempo que o senhor trabalhou nesse projeto, especificamente?

VM: Não, lá também não era direto.

IL: Sei.

VM: Não sei, lá foi até rápido.

IL: Menos de seis meses, talvez?

VM: É, acredito que sim, porque ele fazia e deixava, e fazia alterações, cálculo estrutural, aquela coisa toda. Quantificar quanto foi gasto nele, não tenho uma noção.

IL: E eu tenho também muito interesse em saber, por exemplo, se o Dr. Lelé tinha um engenheiro que trabalhava do lado dele, ou se ele mesmo fazia os cálculos. Você sabe?

VM: A maioria dos cálculos ele mesmo fazia.

IL: Ele mesmo fazia? De estrutura?

VM: De estrutura ele tinha um calculista, não dentro do Instituto, mas que ele consultava muito, que é o engenheiro Roberto Vitorino. Eu sei que ele consultava muito, não digo nessa obra, mas alguma coisa ele deve ter consultado. Muito dos cálculos ele mesmo fazia.

IL: Isso é interessante, porque ele tinha um domínio da técnica muito aprofundado.

VM: Isso.

IL: Mas ele não trabalhava no computador, não é? Ele não tinha o operacional no computador?

VM: Não, não, o único que ele fazia era o memorial de obra direto no computador.

IL: Sei.

VM: Mas o detalhamento, não. Detalhamento ele fazia tudo à mão e passava para os arquitetos, que ele ficava encima, "olha quero que altere". Ia tirando cópia dos pedaços que iam sendo criados e ele ia alterando, mas tudo antes de fazer no computador, ele fazia tudo à mão.

IL: E tem algum registro dele contando isso?

VM: Nada passava despercebido por ele.

IL: Sei.

VM: Ele discutia a dobrinha das peças.

IL: E como era a participação da Adriana nesse processo? Ela teve alguma parte na criação? Ou foi tudo do Lelé?

VM: Ela esteve várias vezes lá. Não sei até que ponto ela se envolveu na execução do projeto.

IL: Sei.

VM: Mas alguma coisa ela deve ter feito. Mas ela, no início da obra, passou a comandar a obra. Então, com certeza muita coisa passou por ela também.

IL: Tanto de detalhamento?

VM: Não. Detalhamento posterior, ou seja, algumas alterações em função de alguma coisa.

IL: Sim.

VM: O detalhamento já estava feito.

IL: Era uma equipe mesmo, que ela participava nesse momento.

VM: Não.

IL: Então, ela veio para a execução da obra, para a coordenação da obra.

VM: Para coordenar a obra. Daí, dentro da execução, a gente fazia alguma alteração, com aprovação do Dr. Lelé, logicamente. Para melhorias, quando fosse o caso, mas feito aqui e transferido para Salvador e ele participava diretamente.

IL: E ele vinha na obra também?

VM: Vinha também, constantemente.

IL: Me parece que é um projeto que ele tinha muito apreço. Diferente do projeto do Hospital Sarah, que é uma obra enorme.

VM: Sei.

IL: Mas o Beijódromo parece que é uma coisa pontual. Um projeto que ele tinha um carinho a mais.

VM: É, porque acho que já era uma obra conversada de executar há muitos anos atrás.

IL: Sei.

VM: E resolveu se fazer naquele período.

IL: Que foi 2008, 2010, alguma coisa assim.

VM: Nós executamos em 2010. Em 2011, eu já vim para a GRAVIA. E, então, foi executada e acho que terminou em dezembro. Nós viemos para cá em julho, agosto, por aí. Aí ficamos uns seis meses para executar, fabricar.

IL: Montar tudo.

VM: Montar tudo, parte civil, tudo. Desde a fundação.

IL: E, para complementar, no Instituto utilizava-se outro *software* além do *AutoCAD®*? Por exemplo, *Revit®*? Ou algum outro *software* assim?

VM: Não tenho conhecimento.

IL: Ok.

VM: Mas nós tínhamos um arquiteto que fazia as maquetes.

IL: Certo.

VM: Então, não sei qual era o programa que ele utilizava, que ele fazia a apresentação da obra.

IL: Em 3D?

VM: Sim, no 3D que não era o *AutoCAD®* propriamente dito, não sei o programa.

IL: Ok.

VM: O *AutoCAD®*, talvez.

IL: Mais algum outro?

VM: Sim.

IL: A parte de desenho técnico e detalhamento era toda feita no *AutoCAD®*?

VM: A parte de maquete eletrônica era tudo criado por ele, praticamente, não tinha tempo para fazer outra coisa.

IL: Esse projetista?

VM: É, esse arquiteto.

IL: Ok.

VM: Ele desenvolveu praticamente todos os modelos 3D. Ele ficava em função disso, embora ele detalhasse, também. Ele pegava para fazer o 3D através de detalhes do *AutoCAD®*.

IL: Entendi.

VM: Então, o 3D ficava bem original àquilo que...

IL: Próximo da realidade construtiva?

VM: Isso. Praticamente conforme o que já tinha sido projetado.

IL: Entendi. E essa parte do desenho técnico era feita no *AutoCAD®*?

VM: Sim.

IL: Você mesmo mexia em *AutoCAD®* para fazer algum detalhe?

VM: Eu fazia algum detalhe, mas eu não sou arquiteto, embora tenha cursado até o quinto ano, mas eu não segui adiante, não. E eu detalhava conforme conversava com o Dr. Lelé.

IL: Entendi.

VM: Aí passava para os arquitetos, para introduzir os detalhes na própria obra.

IL: Ok

VM: No projeto de arquitetura do IBTH, se você der um *zoom* aparece o detalhe. Por exemplo, se eu fizer um corte dessa parede, se eu der um *zoom* vai aparecer o montante que está encostado na parede e os demais. Tudo está detalhado dentro da arquitetura. Porque, na maioria das vezes, o projeto de arquitetura não apresenta esse nível de detalhamento.

IL: É separado.

VM: Sim, você separa. Fica pesado, vai ficando pesado o desenho.

IL: Interessante isso. E para gente finalizar, como que foi essa experiência para você? O que você achava? Você tinha um entusiasmo pela construção? Como era o pessoal dentro da equipe e a relação com Lelé?

VM: Ele sabia distribuir o trabalho para cada um.

IL: Sim.

VM: Ele tinha uma obra maior. Então, cada um ficava responsável por uma parte do desenvolvimento do projeto.

IL: Entendi.

VM: E de lá ia pegando detalhes para cada um. Ele sentava na mesa juntamente com cada um.

IL: Entendi.

VM: Ele já tinha o projeto na cabeça, precisava pegar um detalhe para acrescentar.

IL: E a experiência de trabalhar lado a lado com ele? Como era?

VM: Eu já o conhecia há muito tempo.

IL: É mesmo?

VM: É, já o conhecia através da GRAVIA, desde 1974.

IL: Sim.

VM: Quando houve a construção do Centro Administrativo de Salvador – BA. Então, nessa época eu era jovem.

IL: Sim.

VM: Ele aparecia lá, mas a gente não tinha contato. Uma vez que era sempre os superiores quem tinham um relacionamento com ele.

IL: Sei.

VM: Para o que a GRAVIA estava recebendo em termos de projeto, para ajudar a desenvolver alguma coisa. Mas eu passei a saber quem era o Dr. Lelé a partir dali.

IL: Sim.

VM: Foram muitas outras obras que ele participou.

IL: Ok.

VM: A GRAVIA, aquelas que a GRAVIA tinha condições de participar. Várias obras a GRAVIA tinha concorrência também, nem sempre a GRAVIA estava.

IL: Entendi.

VM: E mais o que deu para fazer. Algumas coisas que a GRAVIA, até protótipo, ele queria que a GRAVIA executasse. Acabava tendo uma relação maior.

IL: O relacionamento dele aqui dentro era muito presente?

VM: Sim, os diretores eram amigos dele desde o início de Brasília.

IL: Entendo.

VM: Desde 1957.

IL: Sei.

VM: 1958, durante a construção de Brasília. Então, eles tinham quase que um compromisso um para com o outro, de poder fazer a necessidade. Porque às vezes, é lógico, a empresa, ela está vendendo o trabalho dela e o Dr. Lelé, no caso, tem a necessidade que seja apresentado aquele trabalho. Então, o Dr. Lelé é orçamentista, também.

IL: Compreendo.

VM: Tudo foi apertado, mas é sempre com honestidade. A parte dele sempre apresentava até os custos dele. Não tinha onde fugir.

IL: Era tudo bem amarrado.

VM: Mesmo que você levasse prejuízo, você acabava fazendo para o objetivo, pela amizade, não era nem ganho, e sim participar da vida dele como arquiteto.

IL: Impressionante!

VM: Foi desse jeito. E eu tive um período que eu saí da GRAVIA e aí ficava lá com ele, mas, também, com os outros colegas de trabalho antigos, que acabaram participando de várias obras dele.

IL: Que bom!

VM: Então, até hoje a gente tem o *WhatsApp* do pessoal do Instituto. A gente compartilha muitos momentos de conhecimento, ou de gozações, várias coisas.

IL: Sim

VM: A maioria está em Salvador.

IL: Sei.

VM: Só eu que era de Brasília e retornei.

IL: Mas você chegou a morar um tempo em Salvador?

VM: Morei, morei dois anos lá.

IL: Morou em Salvador.

VM: É, eu fui numa obra com o arquiteto Fernando Minho.

IL: Sei.

VM: Ele trabalhou muito em conjunto com o Dr. Lelé. Ele queria que eu fizesse orçamento, que eu planilhasse, que eu fizesse orçamento de um projeto que já estava finalizando e passasse um pente fino na parte metálica.

IL: Sei.

VM: Ele me chamou e eu fui. Daí, de lá, eu fui para o Sarah e do Sarah eu fui para o Instituto.

IL: E você chegou a ter contato com aquelas fábricas, aqueles centros de produção do Sarah?

VM: Eu trabalhava lá.

IL: Você trabalhava nesses centros?

VM: Eu trabalhei lá de oito a nove meses até a parte documental do Instituto ficar pronta.

IL: Entendi.

VM: Aí ele me convidou para ir para lá.

IL: Entendi.

VM: Ele estava largando o Sarah e perguntou se eu queria ir para o Instituto. Aí eu preferi.

IL: Como se fosse uma independência dele do Sarah, ele conseguiu montar uma prática dele.

VM: Isso.

IL: Certo.

VM: Ele montou o Instituto e eu acabei saindo do Sarah, também, e fui para o Instituto.

IL: Sim.

VM: Aí surgiu essa obra em Brasília, e a gente não esquece de onde a gente viveu a vida toda, e pedi a ele que eu viesse para fazer essa obra, para ajudar. Aí a gente montou uma indústria no canteiro de obra. Pena vocês não terem participado.

IL: Pena.

VM: Estavam tão perto.

IL: Tem um registro do Haroldo Pinheiro, que é o presidente do CAU BR.

VM: Sim.

IL: Ele foi na obra e fotografou, só que ele não registrou essa fábrica e aí não tem material fotográfico disso. Será que você tem alguma coisa?

VM: Não, quem vai ter é a Adriana.

IL: Adriana, não é?

VM: Ela filmou todos os processos, desde a serralheria, como passo a passo da montagem da obra.

IL: Sei.

VM: Muito legal! Por isso que se você deve entrar em contato com ela. Vai ter material maravilhoso.

IL: Eu entrei em contato com ela.

VM: É, nós acabamos fazendo um galpãozinho lá. Foi construído um galpão para poder abrigar a parte de serralheria.

IL: Sim.

VM: O que era de maior dimensão, acabava não fazendo lá, porque era a estrutura de grande vão.

IL: Sim.

VM: Aí, sim, era feito ao mesmo tempo, mas tinha o platô.

IL: Sim.

VM: Mas foi feito tudo com critério técnico.

IL: E é uma obra fantástica, o Beijódromo.

VM: O Dr. Lelé confiou muito à Adriana todo o andamento da obra, na parte de execução e na parte de montagem, acabamento até o final. Passou muita responsabilidade para ela, até finalizar. Então é isso.

IL: Muito obrigado, senhor Vicente! Muito obrigado mesmo! Meia hora que a gente falou aqui já resolveu bastante.

VM: É que muita gente pensa que a GRAVIA executou, ela não executou.

IL: Sim.

VM: Ela forneceu toda a matéria-prima conforme foi solicitado.

IL: Sim.

VM: Corte, dobra, calandragem, foi feito lá na obra.

IL: Sim.

VM: Mas o que era corte ou dobra, ou através de máquina, ou através de plasma. O plasma foi bem-vindo naquela época para poder fazer todas as coisas curvadas.

IL: Sim, imagino.

VM: Nós tínhamos que depender da GRAVIA mesmo para fazer isso e foi feito. Não é porque eu estou na GRAVIA, não, mas a GRAVIA se esforçou demais para poder atender os prazos, as necessidades, mudança.

IL: Sim.

VM: E a mudança, quando você vai executando, tem uma hora que muda o cronograma, e tem outras necessidades de mudar os planos. A GRAVIA atendeu 100% da expectativa e o Dr. Lelé confiava, porque qualquer outra mudança a GRAVIA acompanhava. Isso aí ele tinha certeza disso.

IL: Sim.

VM: Por isso confiou na GRAVIA.

IL: O Ivaldo, quando a gente visitou o chão de fábrica lá, ele falou: “rapaz, eu virei noite até para fazer esse negócio aí”.

VM: Sofreu, porque estava do outro lado, não estava com ele.

IL: Sim.

VM: Sabia a capacidade que tinha, que a GRAVIA tinha, e as pessoas todas conhecidas.

IL: Sim.

VM: Todas pessoas comprometidas.

IL: Sim.

VM: E aconteceu sem problema nenhum. Eu falo não porque hoje eu estou na GRAVIA, e sim porque na época a gente contou com ela e foi cumprido o prazo pré-estabelecido, sem atraso nenhum.

IL: É bem o modelo que se fala tanto hoje da tal obra seca, não é?

VM: É.

IL: Nada ali foi feito de última hora.

VM: Não.

IL: Tudo ali muito bem planejado.

VM: Muito, já nasceu.

IL: Isso aí é uma coisa fantástica.

VM: Até o canteiro de obra, foi tudo pré-estabelecido lá e já sabíamos o que iríamos encontrar aqui. Cada árvore, onde elas estavam. A locação da obra em relação às árvores.

IL: Vias.

VM: A alta tensão que passa por ali.

IL: Sim.

VM: Sabe? A locação dela foi estudada criteriosamente mesmo, para o meio ambiente lá sofrer o mínimo possível. Criar o canteiro, criar o barracão, criar o platô, foi pré-determinado. Quando ele chegou aqui era fazer tudo que já tinha sido planejado. Até nosso escritório foi em um container alugado, o alojamento do pessoal que veio de Salvador.

IL: Sim.

VM: Vieram montadores, vieram serralheiros.

IL: Sim.

VM: Que a mão de obra aqui já ficava pouco mais difícil de conseguir. Alguns já estavam aqui.

IL: Sei.

VM: Mas a maior parte, vieram de lá. Então, aí conseguiu montar isso aqui. Pessoas daqui conhecidas, pessoas de lá.

IL: Certo.

VM: Pessoas de confiança já do Dr. Lelé da parte de marcenaria, da parte de serralheria, de montagem. Quem faz serralheria não faz montagem.

IL: Sim, equipes diferentes.

VM: É, são pessoas diferentes. Então, está bem, acho que fecha aí.

IL: Muito obrigado! Eu agradeço mesmo.

VM: Se você puder conversar com Adriana, você vai.

Autorização para publicação da entrevista



Vicente Munoz

para Edilene, Rosangela, mim ▾

qua., 15 de abr. 21:35 (há 3 dias)



Igor Lacroix boa tarde!

Reconheço na integra a entrevista feita por você Igor.

Agradeço muito pelo seu trabalho a respeito do Arquiteto Dr. Lelé - João da Gama Figueiras Lima, que não media esforços de trazer a Tecnologia para determinadas plasticidades.

Atenciosamente,

Vicente Muñoz