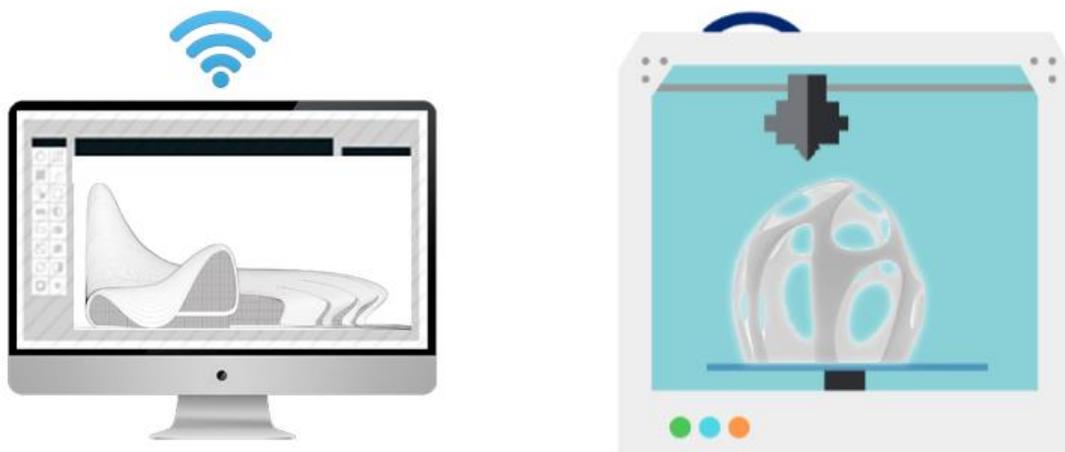


**O PROCESSO DE PROJETO DIGITAL COMO MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO
DA APLICAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D NA ARQUITETURA**



Filipe Lopes de Farias e Silva
Orientador: Prof. Dr. Alexandre Márcio Toledo



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO – FAU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO – PPGAU
MESTRADO EM DINÂMICAS DO ESPAÇO HABITADO – DEHA

Filipe Lopes de Farias e Silva

**O PROCESSO DE PROJETO DIGITAL COMO MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO DA
APLICAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D NA ARQUITETURA**

Dissertação de Mestrado

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Márcio Toledo

Maceió
2018

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Bibliotecário: Marcelino de Carvalho

S586p Silva, Filipe Lopes de Farias e.
O processo de projeto digital como método de investigação da aplicação da impressão 3D na arquitetura / Filipe Lopes de Farias e Silva. – 2018.
165 f.: il.

Orientador: Alexandre Márcio Toledo.
Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado) – Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Maceió, 2018.

Bibliografia: f. 159-163.
Apêndice: f. 164-165.

1. Projeto arquitetônico – Processamento de dados. 2. Arquitetura – impressão digital. 3. Arquitetura – Projetos e plantas. I. Título.

CDU: 72.011:681.624

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

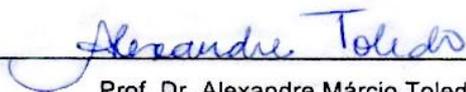
FILIFE LOPES DE FARIAS E SILVA

FOLHA DE APROVAÇÃO

**O PROCESSO DE PROJETO DIGITAL COMO MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO
DA APLICAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D NA ARQUITETURA**

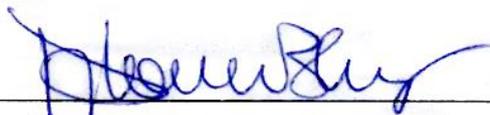
Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas, como requisito final para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

APROVADA em 14/03/2018:



Prof. Dr. Alexandre Márcio Toledo (Orientador)
Universidade Federal de Alagoas – UFAL

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Dilson Batista Ferreira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Alagoas – UFAL



Profa. Dra. Ivvy Pedrosa Cavalcante Pessoa Quintella (Examinador Interno)
Universidade Federal de Alagoas – UFAL



Prof. Dr. Jose dos Santos Cabral Filho (Examinador Externo)
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

“Empty your mind. Be formless, shapeless, like water. You put water into a cup, it becomes the cup. Put into a teapot, it becomes the teapot. Water can flow or creep or drip or crash.

Be water, my friend.

Bruce Lee

RESUMO

A arquitetura contemporânea se apresenta como um campo multidisciplinar que demanda o cruzamento de informações, exigindo do arquiteto o domínio de outras áreas de conhecimento. Os processos de projeto passam a ser influenciados pela tecnologia computacional e pela fabricação digital. A evolução nas pesquisas em arquitetura digital desde o final do último século, permitiu que os padrões dos processos de projetos digitais fossem mapeados e categorizados. Esse avanço, embasado no desenvolvimento da arquitetura paramétrica, nos sistemas generativos e na arquitetura evolucionária, possibilitou que os projetos arquitetônicos fossem desenvolvidos com propósitos mais bem definidos do que na primeira era da arquitetura digital. Similar progresso é observado no potencial dos métodos de fabricação digital, onde o mapeamento e a catalogação de estratégias os consolidam como um prolongamento das possibilidades de construção do edifício. No entanto, pouco foi investigado sobre o recente impacto da impressora 3D, como novo método de materialização da arquitetura, ainda menos foi analisado se o uso de impressoras está relacionado aos processos de projeto citados, ou se há o surgimento de novas metodologias visando o seu uso. Esta dissertação de mestrado em arquitetura e urbanismo tem como objetivo realizar uma discussão teórica a respeito dos processos de arquitetura baseados no encontro da forma, por meio de tecnologias computacionais, bem como em suas integrações com métodos de impressão 3D. A metodologia consiste em uma revisão bibliográfica dos conceitos e autores apresentados pela autora Rivka Oxman sobre o tema da arquitetura digital, assim como uma análise crítica dos 10 princípios da impressão 3D estabelecidos por Lipson e Kurman. O estudo dos casos da recente adoção da impressora 3D por arquitetos é visto sob a ótica das teorias da arquitetura digital e dos princípios classificados por Lipson e Kurman. Os recentes usos indicam que o processo de projeto por sistema generativo pode oferecer estímulo ao uso da impressora 3D. No entanto, a tecnologia de impressão ainda é imatura para oferecer os benefícios propostos em seus princípios e, finalmente, produzir uma materialidade com potencial de benefício real para o usuário do edifício. A sua utilização por arquitetos necessita de maior conhecimento sobre a tecnologia do que frequentemente é divulgado, associando-a a um procedimento de automatismo e facilidade irreal. O potencial da fabricação digital progride com associação entre os métodos subtrativos, formativos e aditivos, e este último não deve substituir os primeiros. O potencial da impressão 3D na arquitetura é amplificado pelo uso de braços robóticos. Finalmente, considera-se importante o desenvolvimento de um processo de projeto específico para a impressão 3D, havendo a necessidade de maior integração entre disciplinas de projeto, engenharia, ciências dos materiais, mecatrônica e seus campos correlatos. Buscou-se contribuir com a implementação de um panorama que guie o arquiteto em um processo de projeto, onde a impressão 3D diminua a lacuna entre a discussão acadêmica dos conceitos teóricos do parametricismo, morfogênese e arquitetura evolucionária, favorecendo as aplicações efetivas desses conceitos na produção arquitetônica contemporânea.

Palavras-chave: Arquitetura digital. Sistemas Generativos. Fabricação digital. Manufatura Aditiva, Impressão 3D.

ABSTRACT

Contemporary architecture presents itself as a multidisciplinary field that requires crossing complex information, requiring the architect's knowledge in other areas. The design processes become more influenced by computational technology and digital fabrication. The evolution in digital architecture research since the end of the last century has allowed the approaches of digital design processes to be mapped and categorized. This advance, based on the developments in parametric architecture, generative systems, and evolutionary architecture, have allowed contemporary architectural projects to achieve clearer goals than in the first era of digital architecture. Similar progress is observed in the potential of digital manufacturing methods, where the mapping and cataloging of well-designed strategies consolidates them as an extension of the building's construction possibilities. However, little was investigated about the recent impact of the 3D printer, as an exponent of new methods of materialization of the architecture. It was not analyzed whether the use of printers is related to the mentioned digital design processes, or if there are new methodologies proposing its use. This master's dissertation on architecture and urbanism aims to make a theoretical discussion about the architectural processes based on form-finding methods, through computational technologies, as well as in its integrations with 3D printing methods. The methodology consists of a bibliographical review of the concepts and authors, presented by researcher Rivka Oxman, on the subject of digital architecture, as well as a critical analysis of the 10 principles of 3D printing established by Lipson and Kurman. The case study of the recent adoption of 3D printers by architects is observed by the perspective of the digital architecture theories and the perspective of the principles classified by Lipson and Kurman. Recent uses indicate that the generative-system design process can offer a boost to the potential of the 3D printer. However, printing technology is still incapable to offer the benefits proposed in its principles, and to finally produce a materiality with real potential for the future user of the building. Its use by architects requires greater knowledge about the technology than it is disclosed, often associating it with a procedure of automatism and unreal ease. The potential of digital manufacturing progresses is obtained with the association of subtractive, formative and additive methods, and that the last should not replace the formers. The additive manufacturing power in architecture is especially released using robotic arms. Finally, the development of a specific design process for the use of additive manufacturing is considered important, and there is a need for greater integration between the disciplines of design, engineering, materials sciences, mechatronics and related fields. It was sought to contribute to the implementation of a panorama that guides the contemporary architect in a design process, where 3D printing bridges the gap between the academic discussion on the theoretical concepts of parametricism, morphogenesis and evolutionary architecture, in favor of an effective application of these concepts in the contemporary architectural production.

Keywords: Digital architecture. Generative systems. Digital Fabrication. Additive manufacturing. 3D printer.

Lista de figuras

<i>Figura 1 - Jornalismo relatando a corrida pelo primeiro uso de impressão 3D da arquitetura (DEZEEN, 2013).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2 - Propostas para o uso da impressão 3D ganham publicidade em grandes sites de arquitetura (DEZEEN, 2013)</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3 - Exposição Non-Standard Architectures e projeto Kol-Mac Studio Sulan Kolatan et William Mac Donald (MIGAYROU, 2001)</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4 - The International Terminal at Waterloo Station em Londres (GRIMSHAW, 2006).....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 5 - Yokohama International Port Terminal, Projeto de Foreign Office Architects (FOA, 2002)..</i>	<i>22</i>
<i>Figura 6 - Esquema base de relações do arquiteto com os quatro componentes do processo de projeto estabelecido por Oxman. (NOGUEIRA, 2013)</i>	<i>25</i>
<i>Figura 7 - a) modelo CAD prescritivo; b) modelo CAD preditivo (NOGUEIRA, 2013)</i>	<i>28</i>
<i>Figura 8 - ether/i, Geneva (GOULTHORPE, 1995).....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 9 - modelo generativo (NOGUEIRA, 2013)</i>	<i>33</i>
<i>Figura 10 - a) desempenho aerodinâmico da fachada; (FOSTER, 2002) b) Courtesy of London Organising Committee of the Olympic Games (LOCOG, 2002); c) Climate Camp (BULL, 2007)</i>	<i>35</i>
<i>Figura 11 - Greater London Authority Headquarters building(FOSTER, 2002)</i>	<i>35</i>
<i>Figura 12 - a) formação baseada em desempenho b) geração baseada em desempenho (NOGUEIRA, 2013).....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 13 - Integração entre os componentes na ilustração da classe dos modelos compostos (NOGUEIRA, 2013).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 14 - Birds Nest, Beijing National Stadium a) modelo geométrico; b) performance estrutural do envoltório. (HERZOG & DE MEURON, 2008).....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 15 - Kunsthhaus, em Graz (COOK; FOURNIER, 2003).....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 16 - a) Geração – simulação de desempenho – avaliação; b) simulação de desempenho - geração – avaliação. (OXMAN, 2008).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 17 - Structure first: localização dos apoios nas maquetes de Frei Otto (OTTO, 1967)</i>	<i>45</i>
<i>Figura 18 - Material first: O material é o principal definidor do encontro da forma (CCDI PTW, 2003)</i>	<i>45</i>
<i>Figura 19 - Mannheim Multihalle (OTTO, 1972).....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 20 - Esquerda: celular automa. Centro: L-tree. Direita: Fractal. Abaixo: respectivos exemplos do uso em arquitetura. (FORNES; HANSMEYER; WILLIS).....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 21 - a) Toyo Ito (2005) b) Arata Isozaki (2003), morfogênese por otimização estrutural.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 22 - Representação em diagrama das relações interdisciplinares propostas por Peter Bentley (NASCIMENTO, 2014).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 23 - Mapeamento das decisões do arquiteto (cinza) e do algoritmo evolutivo (verde) no processo de projeto de Nathaniel Holland, (HOLLAND, 2011).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 24 - População de edifícios. Os indivíduos com melhor desempenho (verde) avançam para a próxima etapa de cruzamento genético. Nathaniel Holland, (HOLLAND, 2011)</i>	<i>51</i>
<i>Figura 25 - Modelo evolucionário utilizado por Nathaniel Holland, (HOLLAND, 2011).....</i>	<i>52</i>

<i>Figura 26 - Interface de programação visual paramétrica da ferramenta Grasshopper no software Rhinoceros, (HOLLAND, 2011).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 27 - Simulações de movimento (GREMMLER, 2016).....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 28 - a) Phaeno Science Centre, (ZHA, 2005); b) Zaha Hadid Architects CODE, Experimental Pavilion for Beijing Biennale, (ZHA, 2013)</i>	<i>54</i>
<i>Figura 29 - pavilhão de cilindros acrílicos projetado para a Bvlgari (NANA ARCHITECTS, 2013).....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 30 - Beijing National Aquatics Center, (PTW ARCHITECTS, 2010).....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 31 - Eden Project po Michael Pawlin (PAWLIN, 2010).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 32 - Esquema de monitoramento do processo construtivo em tempo real (ITKE, 2015)</i>	<i>58</i>
<i>Figura 33 - Contração e expansão de folhas metálicas no Bloom Canopy Project, por Doris Sung (SUNG, 2012).....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 34 - Computação material aplicada ao processo de projeto (ICD/ITKE, 2010).....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 35 - Comportamento do material em diferentes níveis de Umidade Relativa do ar (REICHERT e MENGES, 2008).....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 36 - 3D-printed chaise longue by Neri Oxman (OXMAN, 2014).....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 37 - Hylozoic Ground, Instalação na bienal de Veneza (BEESLEY, 2010)</i>	<i>62</i>
<i>Figura 38 - Form-making vs form finding (SOFLIN, 2012).....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 39 - Vila Olímpica em Barcelona (GEHRY, 1989).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 40 - Pavilhão do automóvel BMW (FRANKEN, 1999).....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 41 - Estratégia de fabricação por cortes sequenciais a) Metropol Parasol Sevilha, Espanha, (MAYER-HERMANN, 2011) B) Interior por Mark Goulthorpe (GRASSL, 2011).....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 42 - Estratégia de fabricação por triangulação (FUKSAS, 2004)</i>	<i>73</i>
<i>Figura 43 - Contraste entre a linguagem fluida e facetada a) Heydar Aliyev Center em Baku, Azerbaijão, por Zaha Hadid Architects, (BAAN, 2013) b) Estação de trem de Logroño, Espanha, por Ábalos + Sentkiewicz arquitectos, (HEVIA, 2009).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 44 - a) Hotelfachschule, Montpellier (FUKSAS, 2012) b) fabricação subtrativa 3D (KYCIA, 2017)</i>	<i>75</i>
<i>Figura 45 - Dobra de tubos metálicos a) Heydar Aliyev Center (ZHA, 2012) b) Leith Street Bridge, Edinburgh (BUROHAPPOLD, 2003)</i>	<i>75</i>
<i>Figura 46 - Comparativo esquemático entre fabricação formativa (alto), subtrativa (centro), e aditiva (abaixo) (3D HUBS, 2017)</i>	<i>76</i>
<i>Figura 47 - Semelhança entre as primeiras propostas de patentes de estereolitografia (Hull, Mehaute, Swainson e Kodama) (SILVA, 2017).....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 48 - Braços mecânicos utilizados por Joris Laarman no IAAC (LARRMAN, 2013).....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 49 - Relação da espessura e inclinação da camada com a suavidade da superfície</i>	<i>83</i>
<i>Figura 50 - Propriedades anisotrópicas das camadas do objeto (MATERIALISE, 2017).....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 51 - Diferentes estados do material antes da deposição; a) sólido, b) pastoso, c) em pó e d) líquido (LABONNOTE et al., 2016).....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 52 - Produtos impressos em uma gama de resinas SLA (FORMLABS, 2017)</i>	<i>86</i>
<i>Figura 53 - Propostas unifamiliares e edifícios verticais por Contour Crafting (KOSHNEVIS, 2006) ...</i>	<i>88</i>

<i>Figura 54 - Bico para formar uma parede por deposição com um interior em forma de nervura, (KOSHNEVIS, 2011)</i>	89
<i>Figura 55 - Objeto Radiolaria antes e depois de retirado o suporte de cama de areia (DINI, 2009)</i>	91
<i>Figura 56 - Impressora D-Shape (DINI, 2009)</i>	91
<i>Figura 57 - a) Impressão por solda (MX3D, 2015) b) impressão com braço robótico (LAARMAN, 2013)</i>	92
<i>Figura 58 - Mapeamento de serviços de impressão 3D, sugerindo mudanças no modo consumo e distribuição (3D HUBS, 2016)</i>	93
<i>Figura 59 - Proporção de investimento entre os diferentes setores (WOHLERS, 2016)</i>	93
<i>Figura 60 - Gráfico do interesse pelo termo 3D printing entre o período de 2004 e 2017 (GOOGLE TRENDS, 2018)</i>	94
<i>Figura 61 - Aspecto multidisciplinar do arquiteto contemporâneo (SILVA, 2018)</i>	95
<i>Figura 62 - Implantes e próteses impressos por manufatura aditiva</i>	96
<i>Figura 63 - Peça otimizada para redução de peso na aeronave (BOEING, 2016)</i>	97
<i>Figura 64 - Protótipo de carro Citroen (MATERIALISE, 2016)</i>	97
<i>Figura 65 - Otimização de topologia para peças de veículos (TOYOTA, 2015)</i>	98
<i>Figura 66 - The Bristle Dress, por Francis Bitonti Studio (BITONTI, 2014)</i>	98
<i>Figura 67 - Francis Bitonti sapato "Molecule" impresso em 3D (BITONTI, 2014)</i>	99
<i>Figura 68 - Sapato desenhado por Zaha Hadid (HADID, 2013)</i>	99
<i>Figura 69 - Design de mobiliário proposto por arquitetos: a) Alvin Huang b) Joris Laarman Lab c) Zaha Hadid Architects</i>	100
<i>Figura 70 - Levantamento das principais instituições (vermelho) e empresas (verde) (SILVA, 2017)</i>	101
<i>Figura 71 - Evolução no número e tipo de publicação acadêmica sobre impressão 3D aplicada à arquitetura nos últimos 20 anos (LABONNOTE, 2017)</i>	102
<i>Figura 72 - Publicação acadêmica sobre ciência dos materiais aplicados a MA na AEC (LABONNOTE, 2017)</i>	102
<i>Figura 73 - Mapeamento de laboratórios de fabricação digital na América Latina.</i>	103
<i>Figura 74 - Modelo para o projeto Radiolaria (DINI, 2009)</i>	104
<i>Figura 75 - Secção do projeto de Gardiner em colaboração com a D-Shape, (GARDINER, 2010)</i> ...	105
<i>Figura 76 - Impressora adaptada para impressão de tijolo cerâmico (PETERS, 2013)</i>	105
<i>Figura 77 - Componente desenhado e instalado após testes de resistência (PRIESTMAN, 2013)</i> ...	106
<i>Figura 78 - "Digital Grotesque" (HANSMEYER; DILLENBURGER, 2013)</i>	106
<i>Figura 79 - Esquerda para direita: "Cool Brick", "Bloom", GCODE.Clay" e "Saltygloo" (RAEL; FRATELLO, 2015)</i>	107
<i>Figura 80 - Pavilhão Echoviren (ALLEN; SMITH, 2013)</i>	108
<i>Figura 81 - Pavilhão "Vulcan" na Beijing Design Week 2015 (YU, 2015)</i>	108
<i>Figura 82 - Projeto anunciado em 2013, com construção prevista em 18 meses, não foi iniciado (UNIVERSE ARCHITECTURE, 2013)</i>	109
<i>Figura 83 - "Canal House" Render, Janela e impressora 3D. (DUS, 2013)</i>	109
<i>Figura 84 - Acima: Cabine de 8m². Abaixo: EU Council Building. (DUS, 2016)</i>	110

<i>Figura 85 - Castelo impresso no jardim de casa (RUDENKO, 2014)</i>	110
<i>Figura 86 - Detalhes das colunas do hotel (RUDENKO, 2015)</i>	111
<i>Figura 87 - Paredes robustas impressas pela empresa chinesa Winsun em ambiente de fabrica e montada no local (WINSUN, 2015)</i>	112
<i>Figura 88 - Impressão em concreto reforçado de ponte para ciclistas pela Universidade Técnica de Eindhoven (TUE, 2016)</i>	113
<i>Figura 89 - Mesh-Mould (HACK, 2012)</i>	113
<i>Figura 90 - Design Miami Exhibition Pavilion (SHOP ARCHITECTS, 2016)</i>	114
<i>Figura 91 - Design Miami Exhibition Pavilion (SHOP ARCHITECTS, 2016)</i>	114
<i>Figura 92 - Drone Landing Pad, Tennessee (KASEMEN, 2016)</i>	115
<i>Figura 93 - Imagem da proposta inicial para a ponte sobre o canal de Amsterdam, (DUS, 2015)</i>	116
<i>Figura 94 - Envolvidos com o projeto desenvolvido pela MX3D (MX3D, 2017)</i>	116
<i>Figura 95 - a) novo projeto (Acima) b) 30% da impressão concluída (Centro) c) cronograma (Abaixo) (MX3D, 2017)</i>	117
<i>Figura 96 - Diferentes soluções de 3DP a) Grua, b) suspenso em cabo c) Swarm d) robótico e) combinado com processo de dobra (LABONNOTE, 2017)</i>	118
<i>Figura 97 - Mini Builders (IAAC, 2013)</i>	118
<i>Figura 98 - Braços robóticos associados a métodos de manufatura aditiva (SILVA, 2016)</i>	119
<i>Figura 99 - Os 10 princípios da impressão 3D (SILVA, 2016)</i>	121
<i>Figura 100 - A complexidade do objeto não influi no custo de execução (THINGVERSE, 2016)</i>	123
<i>Figura 101 - Gráfico de custo: Injeção plástica vs impressão 3D (LABONNOTE, 2017)</i>	125
<i>Figura 102 - Vantagem relativa da impressão 3D sobre a construção tradicional (LABONNOTE, 2017)</i>	125
<i>Figura 103 - Proposta de Aravena com possibilidade de personalização por autoconstrução (ARAVENA, 2016)</i>	126
<i>Figura 104 - Mercados relevantes na fabricação aditiva para AEC (LABONNOTE, 2017)</i>	126
<i>Figura 105 - Objetos articulados impressos sem necessidade de montagem (THINGVERSE, 2015)</i>	127
<i>Figura 106 - Sugestão para impressão de peças interligadas (MATERIALISE, 2017)</i>	128
<i>Figura 107 - Objeto com diversas partes impressas já montadas. (LIPSON; KURMAN, 2013)</i>	128
<i>Figura 108 - Objeto se movimenta mesmo sendo constituído de uma única parte (HASSO PLATTNER INSTITUTE, 2016)</i>	129
<i>Figura 109 - Interface do aplicativo para customização de peças hidráulicas sob demanda para conectar tubos de diferentes diâmetros (FIELD READY, 2015)</i>	131
<i>Figura 110 - Truss Fab (KOVACS, 2017)</i>	131
<i>Figura 111 - Objetos sendo impressos em um equipamento portátil ligado na bateria de um veículo, (FIELD READY, 2015)</i>	132
<i>Figura 112 - Pavilhao 3M, New York (SOFTLAB, 2015)</i>	132
<i>Figura 113 - Infográfico da mudança da cadeia de distribuição (LASALLE, 2013)</i>	134

<i>Figura 114 - Uso de elementos abertos para retirada do material poroso após a impressão (MATERIALISE, 2015)</i>	<i>135</i>
<i>Figura 115 - Objects physics, (EMILY WHITING, 2014)</i>	<i>136</i>
<i>Figura 116 - Diagramas complexos para o uso da manufatura aditiva na escala do edifício (STRAUS, 2013).....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 117 - Canteiro de uma impressora 3D de concreto (RUDENKO, 2015)</i>	<i>139</i>
<i>Figura 118 - Exemplo de fabricação subtrativa onde o volume de material retirado foi 97% (DAISHIN, 2016).....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 119 - Imprimindo com propriedades materiais graduais (HUANG, 2016)</i>	<i>141</i>
<i>Figura 120 - Fabricology, MIT media Labs (OXMAN, N. 2016).....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 121 - Scanner 3D (ARTEC, 2017).....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 122 - a) Microestação de reciclagem de plásticos para impressão precious plastic (HAKKENS , 2016) b) Filamento para FDM (3D SYSTEMS, 2016)</i>	<i>147</i>
<i>Figura 123 - ilustração dos princípios incorporados pelo projeto (SILVA, 2017).....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 124 - ilustração dos princípios incorporados pelo projeto (SILVA, 2017).....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 125 - ilustração dos princípios incorporados pelo projeto (SILVA, 2017).....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 126 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017).....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 127 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017).....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 128 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017).....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 129 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017).....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 130 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017).....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 131 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017).....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 132 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017).....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 133 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017).....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 134 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017).....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 135 - Linha do tempo da relação do arquiteto com a tectônica (SILVA, 2018)</i>	<i>169</i>

Glossário

3DCP – 3D Concrete Printer - Abreviação para Impressão 3D em concreto, na língua inglesa.

3DP – 3D Printer – Abreviação para Impressora 3D, na língua inglesa.

AEC – Arquitetura, Engenharia e Construção.

AM - Additive manufacturing. Definido pela ASTM e ISSO como processo de junção de materiais para criar objetos a partir de dados do modelo 3D, geralmente camada após camada.

AMF - Additive Manufacturing File. É um padrão aberto definido pela ISO / ASTM 52915: 2013 para descrever o arquivo computacional de objetos para processos de fabricação aditiva, como impressão 3D. O padrão oficial é um formato baseado em linguagem XML, projetado para permitir que qualquer software de design assistido por computador descreva a forma e a composição de qualquer objeto 3D a ser fabricado em qualquer impressora 3D. Ao contrário do seu formato antecessor, STL, o AMF possui suporte nativo para cores, materiais e látices.

ASTM - American Section of the International Association for Testing Materials. Órgão estadunidense de normalização responsável por desenvolver e publicar normas técnicas para uma ampla gama de materiais, produtos, sistemas e serviços.

BIM - Building Information Modeling

CAD - Computer-Aided-Design

CAE - Computer-Aided-Engineering

CAM - Computer-Aided-Manufacturing

CC – Contour Crafting – Método de impressão 3D por deposição de concreto em camadas.

CNC - Computer numerical control

D2RP – Design to Robotic Production

D2RP&O - Design to Robotic Production & Operation

DIWO - do-it-with-others

DIY - do-it-yourself

DLP - Digital Light Processing

DMP - Direct Metal Printing

EA – Evolutionary Algorithm

EBM - Electronic Beam Melting

FabLab – Laboratório de fabricação digital aberto ao público

FDM - Fused deposition modeling

FEA – Finite Element Analyses

FEM – Finite Element Method

Fotogrametria - medição das distâncias e das dimensões reais dos objetos por meio da fotografia

GA – Genetic Algorithm

G-CODE - nome comum dado à linguagem computacional que determina o movimento dos equipamentos robotizados CNC.

Generative Design - projeto generativo – método de geração de projeto através de regras ou algoritmos usando programas computacionais

Graphical algorithm editor - Programação Visual – Ferramenta computacional para programação de algoritmos facilitada por Interface Gráfica.

Grasshopper – ferramenta de programação visual integrada ao Software Rhinoceros.

ISO - International Organization for Standardization. Entidade que congrega os grêmios de padronização e normalização de 204 países.

kinetic facade – Fachada ativa com movimento, fachada cinética.

L-Systems – Lindenmeyer Systems, é um sistema utilizado para descrever o comportamento de células de plantas e para modelar os processos de crescimento e desenvolvimento da planta. Esse sistema também têm sido usados para modelar a morfologia de uma variedade de organismos e pode ser usado para gerar fractais.

MA - Manufatura Aditiva

Maker Movement – Movimento de pessoas aplicando métodos D.I.Y e D.I.W.O.

Memory Material – Materiais com memória

Nano Print – Impressão em microescala

NURBS - Non-uniform rational b-spline

Printing Path - caminho percorrido pelo bico de impressão

RBD - Rule Based Design – Pode usar Sistemas algorítmicos como Cellular Automata, L-Systems, Fractais e gramática da forma, bem como outras linguagens computacionais para gerar geometrias 3D a partir de regras pré-definidas.

Rhinoceros – programa CAD

RP - Rapid Prototyping

Shape Shift – Sistemas de materialização que possibilitam posterior mudança de formas.

SLA – Stereolithography

Slicer – fatiador - Software que converte o modelo digital do objeto em G-CODE para impressão em camadas.

SLM - Selective laser melting

SLS – Selective Laser Sintering

Smart Material – Materiais com propriedades consideradas inteligentes, que reagem ao ambiente.

Software - conjunto de componentes lógicos de um computador ou sistema de processamento de dados; programa.

Tool Path - caminho percorrido pela ferramenta posicionada na extremidade de um equipamento CNC

Sumário

RESUMO	6
ABSTRACT	7
Lista de figuras	8
Glossário	13
Sumário	16
Introdução	9
Capítulo 01: Arquitetura digital e os processos de projeto contemporâneos .	17
1.1 A primeira era digital da arquitetura	18
1.2 Modelos de processos de projeto digitais	24
1.2.1 Classe dos modelos CAD	27
1.2.2 Classe dos modelos de formação	28
1.2.3 Classe dos modelos generativos	32
1.2.4 Classe dos modelos de desempenho	34
1.2.5 Classe dos modelos compostos	36
1.3 Desenvolvimentos teóricos de Oxman na segunda era digital da arquitetura	37
1.3.1 Arquitetura do desempenho	38
1.3.2 Tectônica digital	43
1.3.3 Morfogênese digital	46
1.3.4 Arquitetura evolutiva e morfogênese	49
1.4 Os novos caminhos da teoria e prática na arquitetura contemporânea	53
1.5 Conclusões do capítulo	62

Capítulo 02: O contexto inicial e o panorama da impressão 3D na arquitetura

66

2.1 Da industrialização à fabricação digital na arquitetura	66
2.2 Histórico da impressão 3D	76
2.2.1 Tipos de Tecnologia de Impressão 3D.....	80
2.3 O cenário global da impressão 3D	92
2.3.1 Aplicação em campos correlatos	94
2.4 Aplicação na Arquitetura e Construção.....	100
2.5 A linha do tempo da impressão 3D para arquitetura e construção	104
2.6 Conclusões do Capítulo.....	117

Capítulo 03: Os dez princípios da impressão 3D aplicados à arquitetura 121

3.1 Princípios da impressão 3D	122
3.1.1 Princípio 1 - Complexidade é grátis	122
3.1.2 Princípio 2 - Variedade é grátis.....	124
3.1.3 Princípio 3 - Não necessita de montagem	127
3.1.4 Princípio 4 - Tempo de entrega é zero.....	130
3.1.5 Princípio 5 - Liberdade formal ilimitada	134
3.1.6 Princípio 6 - Necessidade de habilidade técnica para fabricação é nula	136
3.1.7 Princípio 7 - Compacta e portátil.....	138
3.1.8 Princípio 8 - Menor perda de material	139
3.1.9 Princípio 9 - Infinitos tons de materiais	141
3.1.10 Princípio 10 - Réplicas físicas precisas	142
3.1.11 Conclusões.....	143
3.2 A relação entre processo de projeto e a Impressão 3D	148
3.2.1 Radiolaria	148

3.2.2 Proto-House	148
3.2.3 Building Bytes	149
3.2.4 Landscape House	150
3.2.5 Casa do canal	150
3.2.6 Echoviren	150
3.2.7 Digital Grotesque	151
3.2.8 Adrian Priestman	152
3.2.9 Rudenko	152
3.2.10 Win Sun	153
3.2.11 ARUP	153
3.2.12 MX3D	154
3.2.13 Conclusões	154
Conclusão	157
Referências	161
Apêndice 01 - O arquiteto e a tectônica	168
Apêndice 02 – Ilustração: Linha do tempo Arquitetura e impressão 3D	171

Introdução

O uso de impressoras 3D para protótipos rápidos, desde o princípio da tecnologia na década de oitenta do século passado, amplificou-se a ponto de tornar-se o padrão de prototipagem rápida na cadeia do design. O desenho inicial, que até então aguardava ciclos semanais ou até mesmo mensais para a realização dos primeiros testes, passou a ser passível de avaliação em algumas horas após a concepção inicial do objeto, fato que proporcionou um avanço evidente de produtividade e qualidade do produto final.

Todavia, além da velocidade proporcionada ainda na etapa de prototipagem, há um avanço recente ainda pouco explorado, um novo degrau no uso da impressão 3D, o da fabricação direta para consumo. Ou seja, a fabricação do objeto, produto, elemento ou peça finalizada, destinada ao uso, e não mais apenas como protótipo.

Apesar de possuir propostas singulares no campo da manufatura aditiva desde o fim da década de noventa, a indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) ainda não obteve êxito no que tange à consolidação de suas técnicas no uso de impressão 3D.

Observa-se, entretanto, uma evolução nesse campo, com exemplos palpáveis da possibilidade de fabricação de elementos de um edifício ou até deste por completo. Para isso, utilizam-se maquinários genéricos – usados em diversos outros campos – assim como maquinários desenvolvidos exclusivamente para aplicação na indústria sobre a qual se comenta.

Tal como vem acontecendo em outras indústrias, o aumento do interesse no uso da impressão 3D por parte de grandes companhias da iniciativa privada, do interesse pelo tema na esfera acadêmica, e de movimentos de democratização do design como os FabLab, Makers, D.I.Y. e D.I.W.O, tem contribuído para que a manufatura aditiva venha sendo validada e adequada às rígidas normas de regulamentação de indústrias como a aeronáutica (EASA, 2018).

O processo de validação e cumprimento dos parâmetros normativos é um ponto crítico na consolidação da impressão 3D no campo da Arquitetura, Engenharia e Construção, no qual os investimentos da iniciativa privada são bem menores do que em outras indústrias (GARDINER, 2011).

Em virtude desses dois pontos acima citados, o uso do potencial da tecnologia como método de fabricação para obras arquitetônicas completas, em edifícios prontos para o uso, ainda vem sendo pouco explorado. Os primeiros exemplos desse uso estão principalmente vinculados ao meio acadêmico, a pequenos grupos de arquitetos e estudantes, ou a escritórios e empresas de pequeno porte e *start-ups*.

Ainda que os exemplos reais da arquitetura na escala do edifício ainda estejam ligados ao modelo de protótipos - em arquiteturas efêmeras e pavilhões - é esse novo nível de exploração que reconhece o potencial da tecnologia de impressão 3D como método de construção do edifício em si, razão que motiva esta pesquisa de dissertação. Esta dissertação visa, a partir da investigação das perspectivas dos arquitetos e pesquisadores pioneiros no uso da impressão 3D, ao conhecimento do panorama conceitual de uma nova arquitetura com possibilidades formais, estruturais e especulações teóricas inéditas.

O potencial da construção em escala real, por ter como resultado o edifício construído, se relaciona diretamente com o usuário do edifício. Assim é possível uma análise arquitetônica completa do edifício impresso, desde o seu estágio inicial - a concepção - passando pela representação, construção e pelo seu estágio final, o uso.

Os quatro elementos de análise arquitetônica desta dissertação são a concepção, a representação, a construção e o uso. Em alguns desses elementos, especialmente no uso, a análise acontecerá principalmente no domínio do campo teórico e no âmbito das propostas conceituais.

Por sua vez, na análise acerca da concepção e representação, será usada a literatura acadêmica com foco no processo de projeto digital paramétrico e generativo. Por fim, no que concerne à análise do método de construção, estarão em evidência pesquisas e autores com foco tanto na aplicação da fabricação digital e robótica na arquitetura como também com foco exclusivo nos processos de Manufatura Aditiva.

A opção por essa análise mais ampla, não por isso menos pontual, parte do pressuposto de que a velocidade dos computadores, dos softwares, dos métodos construtivos, das relações sociais, dos dados, e a versatilidade dos processos de projeto físico-digitais fazem com que os elementos de análise arquitetônica - que antes se distinguiam em etapas processuais claras e distintas - hoje, tornem-se gradativamente indissociáveis ao conceber o projeto em meio digital.

Progressivamente, com o uso de programas computacionais que analisam o desempenho estrutural e a eficiência energética da edificação, o uso de simulações e sistemas generativos, preparação automatizada para processos de fabricação digital, concepção e implementação de fachadas ativas, o uso de interfaces físico-digitais como scanners e sensores, o uso de sistemas físico-cibernéticos em edifícios, tudo isso pensado ainda na fase de concepção de projeto, faz com que os quatro processos - concepção, representação, construção e o uso - associem-se e interponham-se diretamente.

Ao longo da dissertação, a análise acontecerá de modo a pontuar e evidenciar os indícios do impacto da tecnologia de impressão 3D em cada um desses quatro elementos da análise arquitetônica.

O conhecimento dos componentes das impressoras 3D, da resistência e propriedades físicas dos produtos impressos e dos materiais usados na impressão, a linguagem e programação dos softwares são objetos de estudo que possuem seu campo ampliado nos estudos de engenharia mecânica, eletrônica, mecatrônica e pela ciência da computação. Sendo esses alguns dos limites desta pesquisa, este trabalho não irá inclinar-se a fundo sobre esses temas, podendo, no entanto, pontuar onde o conhecimento de algum desses aspectos técnicos possa interferir na relação do uso dessa tecnologia pela prática da arquitetura.

Em suma, a intenção da dissertação não é pesquisar o funcionamento e a mecânica dos equipamentos, mas sim como os projetistas dialogam com os equipamentos e suas lógicas, como expõem Gramazio e Kohler (2013):

“Building with the robot takes architecture far beyond the creation of static forms to the design of formative material processes. Data and material, programming and construction are thereby interwoven so that the algorithmic logic of computer is directly connected with the material reality of built architecture. It becomes possible, then, to intervene directly in the materialisation process and to formulate it according to architectural design criteria. With this change in perspective we open up entirely new ways of reflecting on the physis of architecture, its design and materialisation.”¹
(GRAMAZIO; KOHLER, 2013, p. 15)

¹ Construir com robôs leva a arquitetura para muito além da criação de formas estáticas, para a criação de processos formais de materialização. Os dados e o material, a programação e a construção estão, portanto, entrelaçados de modo que a lógica algorítmica do computador está diretamente conectada com a realidade material da arquitetura construída. Torna-se possível, então, intervir diretamente no processo de materialização e formulá-lo de acordo com os critérios de projeto

A mídia aponta uma corrida em busca do primeiro edifício impresso em sua totalidade pela manufatura aditiva (FAIRS, 2013). O entusiasmo de arquitetos e empresas de construção revela também a busca pela publicidade - relacionada ao interesse do público pelo tema, que comumente o associa a inovação - como uma das motivações por trás do interesse em utilizar a tecnologia (GAGE, 2017).



Figura 1 - Jornalismo relatando a corrida pelo primeiro uso de impressão 3D da arquitetura (DEZEEN, 2013)

As propostas inusitadas veiculadas na mídia são interessantes, e algumas até certo ponto utópicas, o que dificulta uma análise com foco metódico - pelo afastamento que possuem das práticas convencionais da arquitetura contemporânea, inclusive as de vanguarda. Algumas das ideias veiculadas em sites de grande visibilidade incluem propostas como: impressão com energia solar utilizando areia do deserto, construção para colonização da Lua e Marte; e impressão com possibilidade de posteriormente ser “apagada”.



Figura 2 - Propostas para o uso da impressão 3D ganham publicidade em grandes sites de arquitetura (DEZEEN, 2013)

arquitetônico. Com esta mudança de perspectiva, abrimos formas totalmente novas de refletir sobre a física da arquitetura, seu design e materialização. (tradução nossa)

Pelo encantamento criativo que proporcionam, as possibilidades do uso da tecnologia de impressão 3D na arquitetura geram entusiasmo, que é também a vontade e motivação de muitas tentativas e aplicações que subsidiam uma nova materialidade. A título exemplificativo e em consonância com a cultura *Maker* e *DIY*, o arquiteto Bryan Allen e a artista Stephanie Smith completaram, em 2013, uma estrutura de 9 metros quadrados, composta de 585 componentes individuais, impressos em plástico biodegradável, utilizando impressoras 3D desktop convencionais (FAIRS, 2013).

A pesquisa parte do princípio de que uma análise crítica dos processos de projeto digitais pode ser a chave para entender como os equipamentos de fabricação digital tornam-se indispensáveis na materialização de projetos desenvolvidos virtualmente, com formas livres e geometrias complexas, superfícies de dupla curvatura e geometrias não euclidianas.

Por outro lado, entende-se que a utilização dos recursos dos equipamentos de fabricação digital, em especial a impressora 3D, se faz completa somente com o uso dos recursos computacionais de concepção de projetos paramétricos com alta definição, sistemas generativos e evolucionários.

A hipótese desta pesquisa é que a impressora 3D, com seu alcance de alta resolução, é um equipamento com possibilidades únicas dentro da gama de equipamentos de fabricação digital, e se relacionando diretamente com processos de projetos específicos já praticados na esfera profissional, apontam vantagens inéditas no campo da AEC. Com propostas bem definidas, e em sua interação com outras ferramentas digitais como braços robóticos, drones e outros robôs, possibilita a combinação de diferentes métodos de fabricação digital já consolidados – formativo e subtrativo – em equipamentos de fabricação digital híbridos, trazendo uma gama de possibilidades aos conceitos arquitetônicos da computação material, mimetismo, sistemas cinéticos e interações físico-cibernéticas.

Uma das hipóteses secundárias é que as facilidades provenientes da manufatura aditiva corroboram a recente difusão do acesso a equipamentos e meios de projeto e fabricação digital, e assim renovam os laços das tecnologias CAD, CAE e CAM², possibilitando um retorno da colaboração mais próxima entre as disciplinas de arquitetura e engenharia, ampliando essa colaboração com outras disciplinas. Na

² Computer Aided Design; Computer Aided Engineering; Computer Aided Manufacturing

arquitetura, essa colaboração traz o arquiteto para o raciocínio sobre a tectônica e sobre a lógica da programação (SCHUMACHER, 2017).

Outra hipótese secundária é que o uso da Manufatura Aditiva por arquitetos valida-se pela interoperabilidade e apropriação de softwares de diferentes indústrias, como a da animação e cinema (Maya e 3DS MAX), aeronáutica e automobilística (CATIA, Solidworks, Rhino). O modo como o profissional arquiteto opera (LYNN, 2005) interconecta a concepção do projeto, sua representação, fabricação e o uso do edifício. Essas relações e mudanças na atuação profissional geram um novo tipo de arquiteto.

Os programas computacionais CAD e os mais recentes programas utilizados digitalmente para concepção arquitetônica (Solidworks, Rhino, Maya, 3DS MAX, Revit, GenerativeComponents, CATIA, etc.) não se limitam especificamente à etapa de concepção do projeto. Compreendem o uso contínuo do arquivo digital do projeto, para que, de modo eficiente preserve os dados do projeto e seja apto à interoperabilidade entre diferentes softwares, e por fim seja válido - o arquivo digital - para a utilização das possibilidades da fabricação digital direta (*file-to-factory*).

No contexto apresentado, a dissertação visa identificar as novas relações entre a fabricação digital e a arquitetura, a partir do método de impressão 3D. Isso significa principalmente assimilar as possibilidades resultantes da adoção da impressora 3D por arquitetos, o que torna igualmente importante identificar como esses equipamentos vêm sendo também explorados por empresas ligadas à construção.

Poucas empresas de construção adotaram a impressão 3D, algumas *start-ups*, mas nenhuma das grandes empresas de construção como AECOM, ARUP, Royal BAM Group e ACS, ainda que algumas delas, como a ARUP dedique-se a tecnologia na área de pesquisa e tecnologia da empresa. Entender o motivo dessa adoção inicial ter acontecido dessa maneira pode ter algum significado. A adoção por *start-ups* está ligada aos aspectos de inovação, experimentação e disponibilidade de correr riscos.

Busca especificar o desempenho da impressão 3D como método de fabricação do edifício, identificando o que profissionais e acadêmicos pretendem de sua aplicação. Igualmente visa apontar como essa tecnologia se relaciona com o processo de projeto contemporâneo, influenciando na concepção, representação,

construção e contribuindo com o estado da arte da arquitetura e a relação do usuário com o edifício.

São objetivos específicos desta dissertação:

- a. Investigar como os processos de projeto digitais contemporâneos se fundamentam teoricamente, e como conduzem os avanços tecnológicos como propulsores de novas possibilidades arquitetônicas;
- b. Indicar o surgimento da tecnologia e o contexto do surgimento das primeiras investidas de arquitetos na impressão 3D, exibindo os principais métodos de manufatura aditiva, distinguindo-os dos métodos formativo e subtrativo, transmitindo como contribuem com novas possibilidades no campo da fabricação digital aplicada a arquitetura, engenharia e construção;
- c. Refletir sobre os 10 princípios da impressão 3D, notabilizados por Lipson e Kurman, e discutir a sua aplicabilidade na arquitetura, identificando o impacto da impressão 3D como equipamento de fabricação digital, na ampliação das possibilidades buscadas por correntes da arquitetura contemporânea. Em uma análise a partir de estudos de casos, relacionar o processo de projeto com o uso da manufatura aditiva.

Nesta dissertação de mestrado investiga-se o estado da arte da impressão 3D aplicada à arquitetura. Utilizam-se como base metodológica a revisão do referencial teórico, a análise e reflexão crítica, e, por fim uma análise quantitativa e qualitativa tanto sobre os processos digitais de projeto arquitetônico, quanto sobre os exemplos de fabricação arquitetônica com impressão 3D, desde o surgimento da tecnologia até a presente data.

A presente dissertação de mestrado em arquitetura e urbanismo é dividida em três capítulos, cujos conteúdos e metodologias serão apresentados brevemente a seguir.

O capítulo 01 explora os processos de projeto contemporâneos, em busca por relações entre o papel do arquiteto de hoje, as ferramentas digitais de concepção e representação do projeto, e os novos caminhos conceituais das correntes arquitetônicas. Dedicar-se à revisão bibliográfica no tocante à arquitetura digital e aos processos de projeto que a envolvem. Como referência inicial é usada a sistematização da arquitetura digital proposta por Rivka Oxman (2006), sendo

incluídos nessa análise, os avanços na aplicação do modelo evolucionário com algoritmo genético, o parametricismo e a discussão dos métodos de *form-finding*³.

O primeiro capítulo apresenta também as motivações mais recentes em pesquisas e partidos arquitetônicos, avanços na tecnologia dos materiais e caminhos conceituais que buscam mudanças paradigmáticas como a computação material, programação material, meta materiais, materiais com memória, impressão 4D, arquitetura cinética e responsiva, sistemas cinéticos, fachadas adaptativas e computação material.

O capítulo 02 é composto por um histórico do uso da fabricação digital pela arquitetura e construção, contextualizando o surgimento e o reconhecimento da manufatura aditiva, em um campo dominado por métodos subtrativos e formativos. O capítulo contém esclarecimentos sobre os conceitos básicos e um breve catálogo dos principais métodos de impressão 3D. Em seguida é apresentado o cenário global da manufatura aditiva, mostrando o que tem sido explorado em campos correlatos. O capítulo um finaliza com um panorama do recente uso da impressão 3D em propostas arquitetônicas nas esferas profissional e acadêmica.

O terceiro capítulo possui a finalidade de identificar o estado da arte da tecnologia impressão 3D, pela análise teórica dos dez princípios da impressão 3D, colocados por Melba Kurman e Hod Lipson, investigados sob a ótica de sua aplicabilidade na arquitetura. O capítulo exemplifica onde cada princípio pode, ou foi aplicado, confrontando a genuinidade e efetividade de cada princípio. E com que propósito cada princípio pode ser motor de novos paradigmas arquitetônicos.

O capítulo 03 aplica por fim uma análise qualitativa e quantitativa nos projetos de usos de impressão 3D na arquitetura. Busca-se indicadores de relações entre os aspectos da fabricação digital e os aspectos do projeto digital. Dentro do levantamento é mostrado quais projetos de impressão 3D utilizam-se dos princípios de Lipson e Kurman, e como foram exploraram os processos de projetos estudados no capítulo 01.

³ Processo de projeto digital que sugere “Encontrar a forma” do edifício, ao contrário do que se entende acontecer em processos de projeto não digitais, quando o comum é “propor a forma”.

Capítulo 01: Arquitetura digital e os processos de projeto contemporâneos

Este capítulo tem como objetivo discutir os processos de projeto de arquitetura surgidos a partir da introdução do computador, por meio de tecnologias computacionais de auxílio e geração de projeto. Aqui serão estudadas inicialmente as definições conceituais da arquitetura digital a partir da classificação de Rivka Oxman, seguido pela contribuição de outros autores contemporâneos.

Dentre esses autores destacam-se: Achim Menges e os estudos sobre os sistemas físico-cibernéticos; Nathaniel Holland, que utiliza o algoritmo evolutivo propondo o método Inform, form, perform; Kolarevic, Lynn, Burry, Carpo e Picon com suas teorias sobre o digital na arquitetura; Michael Weinstock e o uso de algoritmos na busca de complexidade; Michael Pawlin com a arquitetura biomimética; Gramazio e Kohler com processos voltados para produção e operação espacial por via robótica; Patrick Schumacher e sua defesa ao parametricismo; Neri Oxman e a materialização baseada na biologia; Philip Beesley e a arquitetura responsiva e John Frazer percussor dos sistemas generativos.

A arquitetura contemporânea se apresenta como um campo multidisciplinar que demanda cruzamento de informações complexas, exigindo do arquiteto o domínio de outras áreas de conhecimento como computação, matemática, engenharia, ciência dos materiais e tecnologia da fabricação.

O desenvolvimento dos processos de projeto passa a ser mais influenciado pela tecnologia computacional e pela fabricação digital, tornando-os indissociáveis.

A evolução nas pesquisas em arquitetura digital, desde o final do último século, permitiu que os padrões dos processos de projetos digitais fossem mapeados e categorizados. Esse avanço possibilitou que os projetos arquitetônicos contemporâneos fossem desenvolvidos com propósitos mais bem definidos que na primeira era da arquitetura digital (Oxman, 2006).

Considerando o avanço embasado no desenvolvimento da arquitetura paramétrica, sistemas generativos baseados em performance, e na arquitetura evolucionária – processos que funcionam com o chamado Surgimento da Forma - este capítulo tem como objetivo realizar uma discussão teórica a respeito dos processos de arquitetura baseados no encontro da forma, por meio de tecnologias computacionais. Busca destacar a integração com outras disciplinas, bem como

expandir a pesquisa para novos caminhos teóricos, conceituais e paradigmáticos da arquitetura, como a computação material, shape-shift e arquitetura responsiva, buscando com essa iniciativa trazer o usuário do edifício para o contexto da pesquisa.

Havendo a necessidade de maior integração entre disciplinas de projeto, engenharia, ciências dos materiais, tecnologia da fabricação, mecatrônica e seus campos correlatos, alguns autores incluem esses interesses dentro do processo de projeto, fazendo do arquiteto contemporâneo um profissional que deve discernir sobre os processos de projeto baseados no parametricismo, morfogênese e arquitetura evolucionária - e aplicar de modo efetivo os conceitos na produção arquitetônica contemporânea.

Pode o arquiteto possuir também o papel de - uma vez envolto nas correntes da computação material, arquitetura cinética, biomimética e sistemas físico-cibernéticos – integrar os diferentes campos do conhecimento e participar ativamente como coautor, ou eventualmente, desenvolvedor de processos de fabricação.

1.1 A primeira era digital da arquitetura

A crescente migração do universo analógico para o digital, nos últimos anos, tem despertado o interesse de pesquisadores que buscam compreender os novos processos de concepção e sua aplicação em projetos de arquitetura. Novas metodologias de projeto surgem para ajudar a mapear esses fenômenos e acompanhar a rápida transformação na qual a arquitetura contemporânea é concebida, desenvolvida e aplicada. Atualmente, cada vez mais, os edifícios são projetados por meio de ferramentas digitais, fazendo-se necessárias a discussão e a revisão teórica desse tema.

A arquiteta pesquisadora israelense Rivka Oxman, a qual tem desenvolvido trabalho de grande relevância e reconhecimento nessa área, vem discutindo as bases teóricas do design digital e apresentado conceitos e autores que contribuem para a compreensão dos avanços sobre o assunto. No artigo *Theory of design in the first digital age*, Oxman (2006) argumenta que as novas metodologias de projeto possíveis na era digital podem ser revolucionárias, pois oferecem uma ampla diversidade de alternativas, formas e dinâmicas na arquitetura.

A motivação de Oxman ao propor uma conceituação da arquitetura digital é justificada pela amplitude de questões e assuntos testemunhados em publicações e atuações profissionais. O potencial dos modelos digitais de geração de forma foi

rapidamente reconhecido e adotado por jovens escritórios experimentais, produzindo metodologias de projeto únicas, uma diversidade que por si é um dos fenômenos que constituem os desafios teóricos da arquitetura digital.

Oxman menciona que as publicações acadêmicas desse período são caracterizadas pela ênfase na documentação, explicação e interpretação dos edifícios e suas lógicas racionais, o que a autora identifica como o ponto crítico para responder os questionamentos centrais do futuro da arquitetura digital.

Um dos questionamentos centrais pondera, se de fato, a arquitetura digital é um fenômeno único e uma nova forma de arquitetura, ou se é apenas uma arquitetura convencional realizada com novos meios. A autora opina que, se a suposição de um fenômeno único for válida, poderá contribuir para o surgimento de novas interpretações dos conceitos mais básicos da disciplina, modificando como se pensa a representação, geração e interação (Oxman, 2006).

No momento estudado por Oxman, a autora supõe que a busca por formular diretrizes para a arquitetura digital aparenta ser uma prioridade relevante, tanto para as pesquisas em arquitetura quanto para a prática da arquitetura. O pensamento arquitetônico e a metodologia arquitetônica foram, até a inclusão do digital, centrados em analisar e moldar procedimentos, comportamentos e atividades cognitivas relacionadas a projetar (Cross, 1984, 2000; Mitchell, 1990; Lawson, 1997 apud Oxman 2006). Esses estudos podem servir como base para estabelecer uma comparação, identificação e transfiguração das diferenças entre as convenções existentes no projeto elaborado em papel e no projeto digital (Oxman, 2006).

A autora aponta eventos significativos que contribuíram para o fenômeno do surgimento do discurso da arquitetura digital, os quais estão associados aos novos paradigmas digitais. Como primeiro evento, a autora cita a *Non-Standard Architectures Exhibition* no centro Pompidou em Paris, 2003. O conceito de uma arquitetura não padronizada, não normatizada e não repetitiva foi o foco teórico da exibição, propondo a antítese ao tipológico como a maior característica da arquitetura digital (Oxman, 2006).

O organizador da exposição realizada no centro Pompidou, Frédéric Migayrou, explica que a cultura algorítmica presente nos projetos do evento pode ser observada a partir da ótica filosófica de Badiou e de Deleuze, os quais buscam entender o espaço através da matemática e da interpretação do infinito. O *não padronizado* vem do conceito de singularidade, uma bifurcação no processo de um

algoritmo. Esses projetos originam-se nos avanços matemáticos de Abraham Robinson em 1961 sobre cálculo infinitesimal. Os avanços de Robinson propuseram a base para o uso de números infinitesimais através de operações de lógica (MIGAYROU; MENNAN 2003).

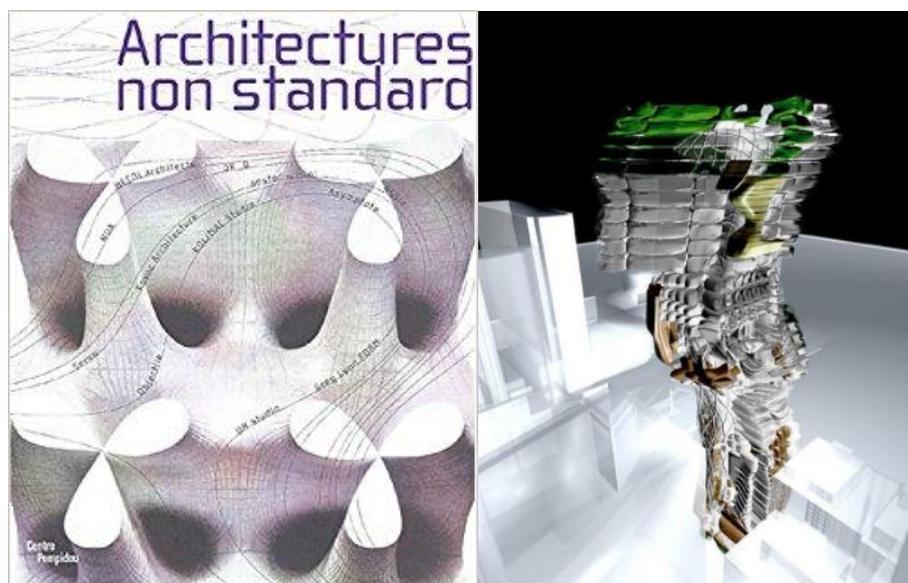


Figura 3 - Exposição Non-Standard Architectures e projeto Kol-Mac Studio Sulan Kolatan et William Mac Donald (MIGAYROU, 2001)

Mitchell (2005) chama o conceito de uma arquitetura projetada, documentada, fabricada e montada assistida por meios digitais de *digitally mediated design*. Segundo ele, sendo uma oposição ao modernismo industrial e ao desenho no papel, essa nova arquitetura é caracterizada pelo elevado nível de complexidade, possibilitando respostas mais sensíveis e flexíveis ao contexto do local, do programa e dando vazão a uma expressividade maior.

O Terminal Internacional da Estação de Waterloo, em Londres, projeto de Nicholas Grimshaw, é um edifício pioneiro de projeto linear contínuo, não repetitivo, "evolutivo". Sua forma de vidro sinuoso e curvilíneo foi projetada usando técnicas iniciais de projeto paramétrico que se tornaram o fenômeno mais comum do design contemporâneo (OXMAN, 2006).

A repetição, segundo Oxman (2006), dissemina uma suposta estabilidade, quando na verdade o mundo apresenta uma imagem de dinamismo e constante mudança. A nova arquitetura digital enfrenta, então o normativo, o estático e o tipológico, o que representa uma mudança paradigmática. Esse argumento é o mais usado por Schummacher (2015) ao defender o parametricismo como o modelo ideal de concepção.

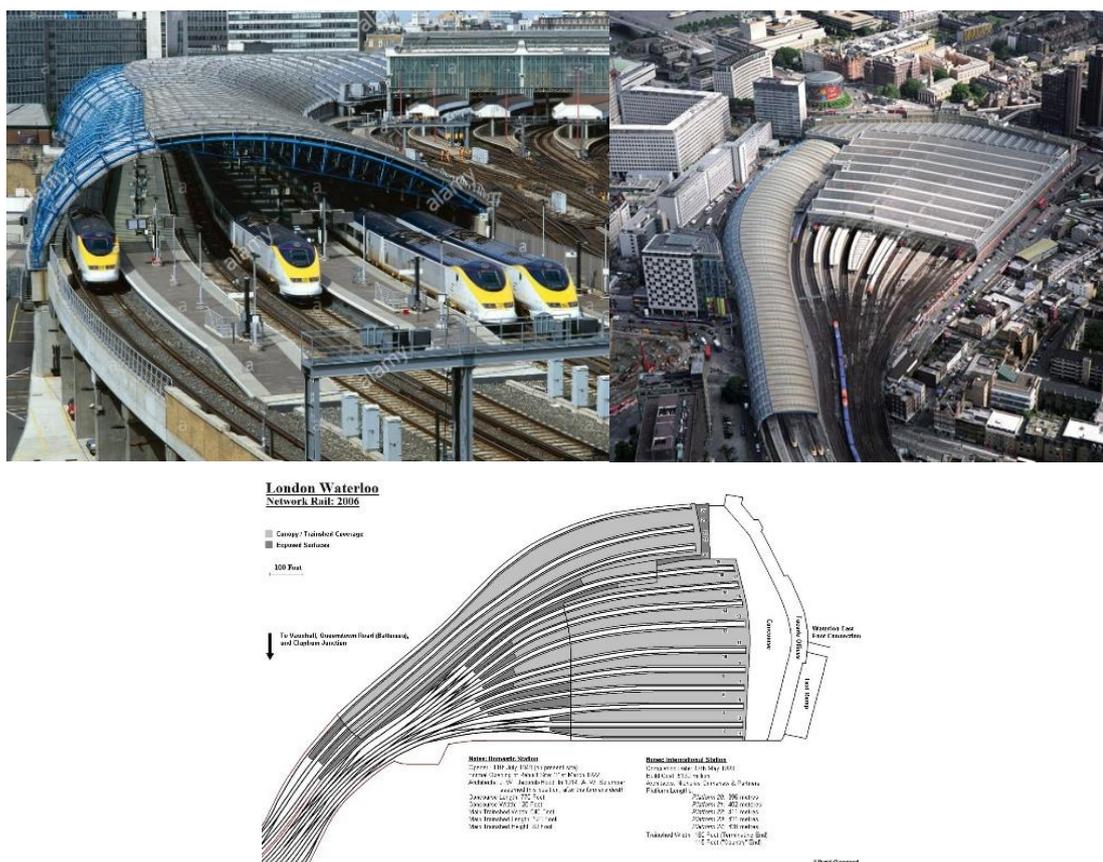


Figura 4 - The International Terminal at Waterloo Station em Londres (GRIMSHAW, 2006)

O avanço possível pela arquitetura paramétrica está na concepção de uma organização espacial não hierárquica, com transições espaciais transformadas, alta continuidade (figura) e conectividade espacial (OXMAN, 2006). Esse avanço nasce na arquitetura da dobra, arquitetura líquida e no blobismo, exemplos iniciais da arquitetura digital possibilitados pelas curvas NURBS e avanços topológicos.

“A topologia é considerada uma geometria não euclidiana, podendo ser exemplificada por ações de encolher, esticar e deformar, chamadas de transformações homeomórficas. Consiste no estudo da estrutura da forma de objetos e não da sua geometria, resultando em formas geométricas complexas, incluindo superfícies topológicas ou hiper-superfícies. Associa-se também aos conceitos teóricos relacionados à morfologia de complexidade, tais como hiper-continuidade e hiper-conectividade.” (TOLEDO, 2016)

Segundo Kolarevic (2003), a topologia é o elo que une todas as formas de projetos digitais.



Figura 5 - Yokohama International Port Terminal, Projeto de Foreign Office Architects (FOA, 2002)

O Projeto do Porto Internacional de Yokohama, concebido pelo escritório Foreign Office Architects, está entre os primeiros casos a enfatizar o que pode ser chamado de “hiper-continuidade”, tendo sido projetado em um período no qual os métodos e teorias da arquitetura digital evoluíram rapidamente (OXMAN, 2006).

A produção literária, conferências, competições e exposições dos anos 90 foram catalisadores do discurso da arquitetura digital. Essa produção teórica, que influenciou a arquitetura e a pesquisa, tenta hoje seguir dois caminhos. O primeiro é distinguir a arquitetura digital como metodologicamente única, capaz de resultados significativamente singulares; o segundo é a tentativa de definir o próprio conteúdo ímpar dessa arquitetura digital (OXMAN, 2006).

As novas características formais da arquitetura digital foram influenciadas pela facilidade com que os novos *softwares* manipulam a geometria, possibilitando meios avançados de geração de forma.

“O avanço da topologia ocorreu em paralelo ao desenvolvimento tecnológico, à medida que se aprimoravam os programas computacionais como o CAD (Computer-Aided Design) e as curvas NURBS (Non Uniform Rational B-Splines), possibilitando, finalmente,

manipular as formas digitalmente, conformando o método topológico.” (TOLEDO, 2017)

O impulso por uma diversidade formal pode ter ocorrido como uma rejeição às estratégias compositivas em vigor até a década de 1980. Em oposição ao que vinha sendo praticado, o design da década de 1990 favoreceu a investigação material e performativa, capaz de produzir geometrias topologicamente complexas e diferenciação formal sobre a continuidade do edifício. A forma evoluída começou a substituir a complexidade e a contradição.

O novo interesse pelo aspecto performativo, tectônico, geométrico topológico e material do edifício reflete uma crítica implícita à complexidade injustificada, motivada pela geração anterior. Na arquitetura, o Museu Guggenheim de Bilbao, projeto de Frank Gehry, foi o proeminente exemplo de moldar novas direções formais e postular novos meios de projeto, livres de formalismos linguísticos (OXMAN, 2006).

A morfogênese, termo advindo da biologia, surge na arquitetura como um processo de geração digital da forma. Mencionada como um processo de “encontro da forma” ou “surgimento da forma”, relaciona-se com diversas técnicas generativas livres de formalismos compositivos.

“Os modelos generativos se caracterizam pelo fornecimento de mecanismos computacionais de processos de geração de formas, derivadas de regras, relações e princípios generativos. No processo generativo, o projetista interage com os mecanismos generativos e as formas resultam de processos pré-formulados, por meio de modulação interativa que proporciona o controle de escolhas das soluções.” (TOLEDO, 2017)

Rivka Oxman levanta que os escritos teóricos mais significativos, na tentativa de formular um novo discurso, buscavam abranger a transição dos aspectos mais fundamentais da disciplina - como o conhecimento formal e a representação – a uma nova ótica (Kipnis, 1993; Kwinter, 1998, 2001; Somol, 1994, 1999 Apud OXMAN, 2006). Com uma outra abordagem, autores como van Berkel and Bos (1999 Apud OXMAN, 2006) publicaram importantes escritos buscando consolidar o projeto como uma atividade voltada à pesquisa, introduzindo conceitos como o do diagrama. Outro marco foi alcançado com a publicação *Folding in Architecture* de Greg Lynn, em uma edição especial do jornal AD em 1993.

Rivka Oxman (2006) ressalta que, consolidando o alto nível de interesse, uma série de eventos internacionais demonstra o papel central que a teoria, os métodos e a prática digital passaram a ocupar no discurso arquitetônico. Publicações do instituto FRAC (*Fonds Régional d'Art Contemporain du Centre*) foram centrais na documentação da arquitetura digital desde 1991, bem como impulsionaram a temática com simpósios, exposições anuais e a série de livros “*Archilab*”.

A autora destaca também a publicação *Future Studies Project*, patrocinada pelo RIBA (*Royal Institute of British Architects*) em 2002, e a conferência *Non-Standard Praxis*, no MIT em 2004 – uma continuação do evento *Non-Standard Architectures* em 2003 no centro Pompidou – como representantes do estado da arte da arquitetura digital. Ainda assim, mesmo diante de uma grande quantidade de produção acadêmica, arquitetônica, e distinções metodológicas, não foi possível classificar a arquitetura digital como uma forma de arquitetura singular (OXMAN, 2006).

1.2 Modelos de processos de projeto digitais

Oxman define o processo de projeto digital como sendo o ponto de partida para clarificar e identificar as singularidades da arquitetura digital. A autora levanta questões centrais a respeito da transformação dos processos de projeto analógico por meio dos novos meios de tecnologia digital, e propõe uma estruturação em série dos modelos de métodos de projeto digitais.

Oxman busca primeiramente definir uma taxonomia, identificando os componentes a serem avaliados nos modelos de projeto, suas estruturas lógicas e morfologia.

Os primeiros modelos de processo de projeto não digitais tradicionais foram representados simbolicamente como sendo um processo cíclico e linear. Gradualmente, a representação desse processo cíclico passa a possuir uma taxonomia própria, usada para definir as etapas e subetapas do processo. Nesse primeiro momento, é identificada majoritariamente a presença de procedimentos como a formulação de problema-situação, síntese-geração, representação e avaliação, os quais seriam processos genéricos presentes em cada sequência cíclica do projeto (OXMAN, 2006).

No início dos anos 80, camadas de análise cognitiva começaram a ser introduzidas no processo de projeto por Schon e Wiggings (SCHON, 1983; SCHON e

WIGGING, 1988, Apud OXMAN, 2006), colocando o foco principal no próprio arquiteto no tocante ao estudo no pensamento arquitetônico. Esses modelos começaram a sugerir estarem aptos a captar a complexidade do pensamento do arquiteto ao projetar (LAWSON, 1997, Apud OXMAN, 2006), enfatizando a interação do arquiteto com a representação do problema. O projeto é definido pelo processo de recepção (percepção), reflexão (interpretação) e reação (transformação). A terminologia conceitual de Schon define o projeto como a “interação com o meio visual” para “informar posteriormente projeto”.

Além de estabelecer o papel central do arquiteto em toda a interação no processo de projeto, esse modelo tradicional é significativo mesmo em modelos de projeto digital. Esse conceito tem implicações para o meio do projeto digital na medida em que implica que o controle dos processos digitais, por mais complexos que sejam, é baseado na interação e reflexão com o arquiteto. O grau de interação e controle do arquiteto em relação ao seu projeto se torna uma característica complexa e marcante na definição dos métodos de projeto digital.

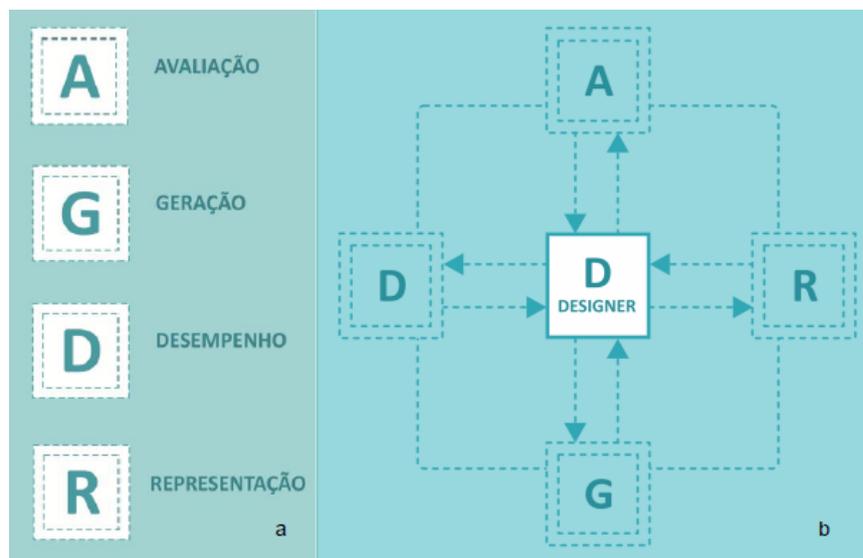


Figura 6 - Esquema base de relações do arquiteto com os quatro componentes do processo de projeto estabelecido por Oxman. (NOGUEIRA, 2013)

O papel do arquiteto, segundo a autora, não havia sido sistematicamente explicado nos modelos iniciais de processo de projeto analógico. No processo de projeto digital, a interação com representações digitais levanta a necessidade de explicar qualitativamente e conceitualmente essas interações. O arquiteto mantém simbolicamente a posição central no processo, no entanto a natureza da interação e o tipo de controle que possui no processo são significantes na avaliação sobre os processos (OXMAN, 2006).

A interação do arquiteto nos processos de projeto foi mapeada por Oxman, e representada em diagramas que analisam as propriedades implícitas e explícitas das interações digitais e não digitais do arquiteto com os quatro componentes do processo de projeto estabelecidos pela autora: representação, geração, avaliação e desempenho (TOLEDO, 2017).

O componente de representação é fortemente relacionado ao meio representacional. A atividade de geração inclui procedimentos generativos - a geração e a interação com a forma digital diferem fundamentalmente da geração e interação com a representação analógica. A componente avaliação inclui procedimentos analíticos e de julgamento. Por fim, o componente desempenho inclui processos performativos relacionados à programação e considerações contextuais do projeto.

Nos modelos tradicionais de processo de projeto, as atividades de geração e avaliação aconteciam de modo implícito, não possuindo procedimentos formais. Por esse motivo, essas atividades eram associadas à intuição e à criatividade. Nos modelos de processo digital, o aspecto computacional exige que o processo cognitivo do arquiteto seja bem formulado e explicitado, para que o projeto possa ser implementado em meio digital.

Dois tipos de relacionamentos do arquiteto com os componentes do projeto foram também estabelecidos por Oxman: relacionamentos por interação externa, ou seja, interação tradicional com as formas; e relacionamento por interação interna, ou seja, passar a informação por meio de mecanismos digitais.

Quatro tipos de relacionamentos do arquiteto com os componentes do projeto foram também estabelecidos por Oxman: (1) interação com representação livre de forma não digital através do papel, baseada no croqui, no desenho ou maquete; (2) interação com construções digitais, típica do modelo CAD e da interação com o modelo digital, desenho digital ou croqui digital; (3) interação com uma representação digital gerada por um mecanismo, em que o arquiteto interage com um projeto digital produzido por um sistema generativo de acordo com um conjunto de regras e relações predefinidas; (4) interação com um ambiente digital que gera a representação digital, típico da interação com o lado operativo de um mecanismo de projeto generativo, ocasião em que o arquiteto interage com o mecanismo que gera a representação digital.

Toda a sistematização de Oxman (2006), ao mapear componentes e definir tipos de relacionamentos genéricos, foi capaz de estruturar uma análise compreensiva das possibilidades dos processos de projeto digital.

Como resultado – dos diversos tipos de relacionamento do arquiteto, seu conteúdo conceitual, procedimento de projeto aplicado e o edifício projetado em si – Oxman propõe dividir os modelos de processo de projeto digital em cinco classes paradigmáticas: classe dos modelos CAD (1); classe dos modelos de formação (2); classe dos modelos generativos (3); classe dos modelos de desempenho (4); e classe dos modelos de composição integrada (5).

Os modelos paradigmáticos são propostos em uma estrutura sucessiva de desenvolvimento. Nessa sequência também são apresentadas as mudanças e as modificações em cada um dos modelos digitais sucessivos. Pode ser observado que relações não explícitas, do arquiteto com os componentes, passam a tornar-se explícitas na medida em que incorporam procedimentos digitais. Essa gradual sucessão dos modelos é acompanhada por explanações que traçam a sua evolução, principais propriedades, tipos de interatividade e indica – em cada modelo – os níveis de integração entre os componentes.

1.2.1 Classe dos modelos CAD

O início da tecnologia CAD marcou a saída do processo baseado no papel. Oxman divide o modelo CAD em dois tipos: descritivo e preditivo. O primeiro tipo, chamado “descritivo”, é baseado na interação tradicional com as representações 2D e 3D que posteriormente automatizam a produção dos desenhos e a visualização dos modelos arquitetônicos. O uso comum dos sistemas CAD pode ser descrito como a manipulação de objetos digitais através de representações gráficas. Esse modelo possui pouca diferenciação em relação ao desenho convencional no papel.

Indo além da inicialmente aplicada elaboração, modelagem e renderização de objetos, os sistemas CAD passaram a incorporar uma automação integrada de análise e síntese. Foi desenvolvido décadas atrás, aplicando processos analíticos sobre os modelos geométricos digitais, descritos por Oxman como modelos preditivos em oposição a modelos descritivos. Esses tipos de processos analíticos e avaliativos em CAD são geralmente associados à estimativa de custos, comportamentos estruturais e desempenho ambiental, etc. A expansão dos dados associados ao modelo digital, para áreas como a modelagem de produtos, permite a integração de

vários softwares de modelagem e avaliação avançada em nível de construção, nas diferentes fases do projeto.

Podendo prever o funcionamento real do projeto, esse modelo CAD é chamado de “preditivo”. Nele, os dados da construção digital, passível de avaliação, podem permitir a colaboração entre diferentes equipes, como arquitetos e engenheiros estruturais. Oxman considera que, ao fazer-se previsível, esse processo torna explícito o que era implícito no modelo baseado no papel.

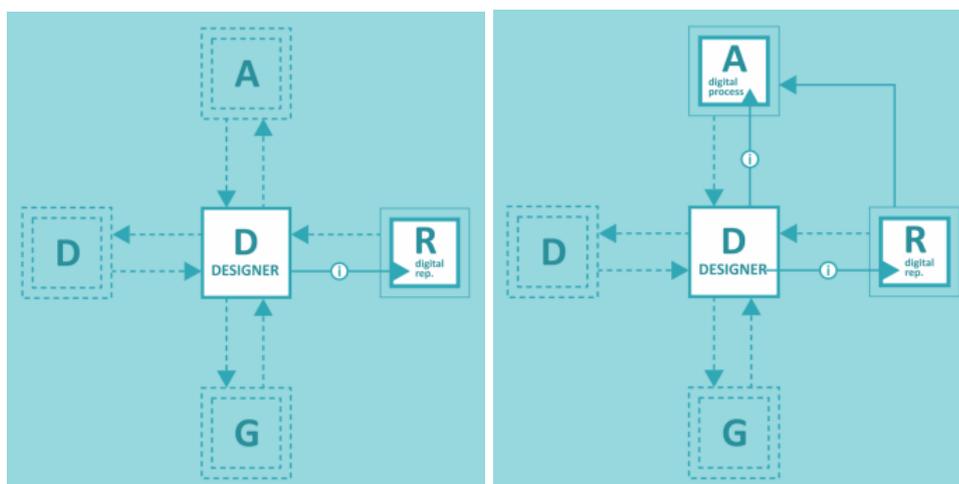


Figura 7 - a) modelo CAD prescritivo; b) modelo CAD preditivo (NOGUEIRA, 2013)

Vale notar que, nesse modelo preditivo, a informação da componente representação é compartilhada diretamente com a componente avaliação. O resultado da avaliação, no entanto, retorna ao arquiteto, para que este realize manualmente as alterações que desejar no modelo CAD, que então pode passar por uma nova avaliação.

1.2.2 Classe dos modelos de formação

O modelo de formação tem por base diferentes técnicas para definição da forma. A geração da forma nesse processo é ligada na interação com um *facilitador digital*⁴. O arquiteto pode aplicar técnicas de *script*⁵, permitindo-lhe a interação e a operação dentro da lógica não determinista do ambiente generativo da forma e não com a representação explícita de uma forma em particular. Portanto o surgimento de processos digitais não determinísticos é uma característica complementar do processo de projeto digital.

⁴ Tradução do autor - *enabling digital technique* no original (OXMAN, 2006)

⁵ Conjunto de instruções em linguagem computacional para que uma determinada função seja executada por um programa de computador - dicionário digital Collins.

Esse nível de controle e interação não determinístico com o ambiente digital é, segundo Oxman (2006), a primeira característica exclusiva proveniente do fenômeno da arquitetura digital. No entanto convém notar que, independente da sofisticação e do nível de performance da tecnologia utilizada, a interação visual continua a acontecer por uma interface gráfica, e a ênfase é primeiramente nos aspectos formais e geométricos do projeto.

“Os modelos de formação se caracterizam pela utilização de técnicas digitais para a geração da forma, com ênfase nas qualidades formais/geométricas dos desenhos. Resulta na emergência de um projeto não determinístico, no qual o projetista possui uma alta capacidade de interação e controle do ambiente digital, sendo o produtor de ferramentas para a geração da forma.” (TOLEDO, 2017)

No processo de projeto digital, alguns conceitos do processo de projeto baseado no papel perdem a centralidade. A exemplo da componente representação, essencial para validar e explicar concepções no modelo baseado no papel, em certos processos da arquitetura digital, as implicações formais do conceito de representação podem ser negativas e improdutivas (OXMAN, 2006). Esse fenômeno pode ser observado no exemplo do Guggenheim de Bilbao, construído sem treva, onde os desenhos foram utilizados exclusivamente para aprovação nos órgãos responsáveis pela autorização da construção.

Os formalismos da arquitetura digital movem-se em direção a conceitos dinâmicos, que estão criando uma nova definição da função da representação em si.

Oxman diz que, ao liberarem-se da lógica convencional da representação, as teorias da arquitetura digital transformaram o conceito da *forma*, no conceito da *formação*. Essa análise está em consonância com a transição para um modelo de *form-finding* e *form-searching*. O processo digital explora a formação baseada no surgimento (*emergence-based*), em que o procedimento do uso da representação digital substitui a natureza experimental do croqui à mão livre, tornando explícito mais um procedimento antes implícito.

Oxman identifica três subclasses para o processo de projeto de formação. A primeira é denominada *projeto topológico*, e baseia-se na exploração da topologia e geometria não euclidiana, para criação de meios de projeto para a formação. A segunda, denominada *projeto associativo*, é baseado em princípios de projeto paramétrico e componentes generativos. A terceira, chamada de *projeto dinâmico*, é

baseada em técnicas de animação, metamorfose e outras técnicas de formação pela ação do tempo, que podem propagar múltiplas instâncias em um ambiente continuamente dinâmico.

“A topologia é considerada uma geometria não euclidiana, podendo ser exemplificada por ações de encolher, esticar e deformar, chamadas de transformações homeomórficas. Consiste no estudo da estrutura da forma de objetos e não da sua geometria, resultando em formas geométricas complexas, incluindo superfícies topológicas ou hiper-superfícies. Associa-se também aos conceitos teóricos relacionados à morfologia de complexidade, tais como hiper-continuidade e hiper-conectividade.” (TOLEDO, 2017)

Devido à dramática característica formal que pode ser associada a esse modelo, na segunda metade da década de noventa, houve um significativo desenvolvimento teórico acerca da topologia, de onde surgiram os termos hiper-superfícies, arquitetura blob e hiper-corpo.

Assim, o projeto topológico pode ser visto como a definição dos primeiros registros formais da nova visão filosófica da arquitetura. Tentando acomodar a nova complexidade de condições interligadas não lineares de projeto em rede, afasta-se dos métodos de lógica estática e determinista da geração anterior (Oxman, 2006).

O projeto associativo, por sua vez, é baseado em técnicas paramétricas de projeto que exploram a geometria associativa. A modelagem paramétrica é um instrumento associativo que interliga e compõe por uma série de parâmetros e regras. Esse instrumento, capaz da obtenção de variáveis combinações, exige um pensamento lógico, associativo e explícito sobre processos interativos, o que requer disciplina, organização sobre o processo de projeto e pensamento abstrato (TOLEDO, 2017). A parametria explora geometria associativa, descrevendo as relações entre objetos, criando relações de interdependência e definindo o comportamento dos elementos (OXMAN, 2008).

No modelo associativo, as relações entre os objetos são explicitamente descritas, estabelecendo interdependências entre os vários elementos do edifício. Parâmetros específicos do projeto são declarados, e não sua forma. Modificando valores dos parâmetros diferentes, configurações podem ser criadas, enquanto se mantêm as relações topológicas (OXMAN, 2006).

Oxman (2006) observa que o potencial de interatividade e controle dos sistemas paramétricos os torna especialmente úteis aos ambientes digitais mais complexos, como os de desempenho. Dentre os conceitos disponíveis com o modelo paramétrico estão os de adaptabilidade, continuidade, proximidade e conectividade.

O modelo de formação baseado no movimento surge do conceito da negação ao espaço estático, e introduz os novos conceitos de espaço dinâmico e forma dinâmica que produzem novos tipos de projetos interativos, dinâmicos e responsivos.

O uso de técnicas de animação quadro-a-quadro e simulações de movimento e outros conceitos provenientes do cinema contribuíram para dinamizar e oferecer novos potenciais na geração da forma. No entanto, mesmo diante de todo o dinamismo e interação no processo de projeto, a forma final da arquitetura é estática, uma captura do movimento é materializada, como congelando o tempo. O projeto *Ether/1* do grupo dECOi serve como exemplo desse modelo, tendo sua forma definida pela captura em vídeo do movimento de um coreógrafo.



Figura 8 - ether/i, Geneva (GOULTHORPE, 1995)

Capturar o movimento é uma prática que foi realizada antes da era digital, usando luz, fotografia ou pintura, podendo ser visto no vídeo de Norman McLaren em 1968 (GREMMLER, 2016). O que difere os procedimentos sugeridos por Lynn (1999) desses procedimentos analógicos ou da simples captura do movimento é principalmente o uso do software de animação para a geração da forma. As ferramentas digitais dos softwares voltados para o cinema permitem uma série de controles sobre a linha do tempo, oferecendo uma manipulação semelhante à dos processos paramétricos, podendo ser determinados diferentes parâmetros de animação.

A manipulação da linha do tempo foi um elemento inicialmente exclusivo de softwares de animação, passando a ser incorporado em processos de projeto por Greg Lynn, e muito depois passou a se fazer presente em softwares paramétricos

voltados para o desenho industrial, como o Autodesk Fusion 360 (2017). Possivelmente esse procedimento é a herança mais nítida do modelo baseado em movimento, e, além de uma ferramenta paramétrica, os processos de movimento operam como uma ferramenta robusta de visualização e representação do projeto arquitetônico, utilizada por arquitetos como auxílio em tomadas de decisões (HANSMEYER, 2012).

Do mesmo modo que Gehry (2006) disse que sua maior contribuição para a arquitetura não está na sua obra arquitetônica, e sim no processo de projeto e fabricação, a arquitetura baseada no movimento contribui não com o projeto de um edifício, mas principalmente com o processo de projeto. Os princípios dinâmicos e de movimento no espaço se fazem presentes, como conceito, nos espaços de hiper-conectividade e a oposição ao estático é a base da arquitetura responsiva e cinética.

1.2.3 Classe dos modelos generativos

No modelo generativo, o projetista desenvolve um sistema, ou seja, uma sequência finita de regras, raciocínios e operações, que oferece soluções baseadas nas melhores possibilidades de resposta ao resultado pretendido. Diferente do modo de projetar convencional, pelo qual o arquiteto tem contato direto com o objeto arquitetônico, sua criação e desenvolvimento no modelo generativo, o mesmo atua na confecção do sistema, e toda alteração almejada ao objeto arquitetônico é condicionada a uma modificação no sistema inicial de geração.

“Os modelos generativos se caracterizam pelo fornecimento de mecanismos computacionais de processos de geração de formas, derivadas de regras, relações e princípios generativos. No processo generativo, o projetista interage com os mecanismos generativos e as formas resultam de processos pré-formulados, por meio de modulação interativa que proporciona o controle de escolhas das soluções.” (TOLEDO 2017)

Nesse modelo, o computador, além de seu papel mais convencional como desenhista, visualizador, verificador de dados e analista de desempenho, agora se torna um gerador de projeto (SHEA et al, 2003)

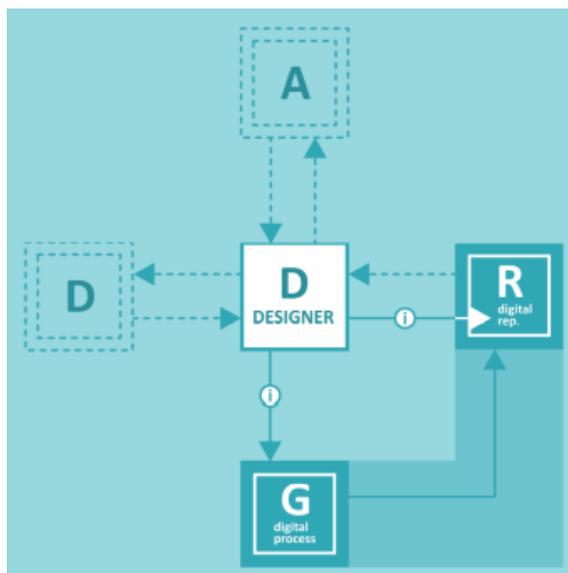


Figura 9 - modelo generativo (NOGUEIRA, 2013)

A classe dos modelos generativos, como definida por Oxman (2006), possui duas subclasses: a subclasse do método evolucionário, e a subclasse da gramática da forma.

A gramática da forma é um mecanismo generativo baseado em regras de composição. Oxman (2006) diz que há uma transição em curso no uso da gramática da forma. Inicialmente voltada para a composição espacial, a gramática da forma passou a ser pensada como composição topológica, voltada para a lógica tectônica, material e morfológica.

“A gramática da forma, desenvolvida no início da década de 1970, por George Stiny e James Gips (1972), é um sistema de geração de formas baseado em regras e tem sua origem no sistema de produção do matemático Emil Post (1943) e na gramática generativa do linguista Noam Chomsky (1957). [...] baseado num conjunto de regras que definem uma linguagem e permite explorar diferentes composições arquitetônicas [...] Quando se aplicam as regras de uma gramática, altera-se um conjunto de formas iniciais compostas por formas primitivas (pontos, linhas, planos e volumes), que podem ser manipuladas por meio de operações booleanas – como intersecção, união e subtração – ou por transformações euclidianas – como escala, rotação, reflexão e translação.” (TOLEDO, 2017)

No modelo evolucionário, o surgimento da forma é considerado o resultado de um processo evolutivo. Os algoritmos genéticos, utilizados nesse processo,

possuem papel preponderante em várias áreas de pesquisa. A interação nesse processo é muito pequena, o processo de geração é automático.

Oxman menciona que outros processos baseados nos modelos evolutivos da natureza estão sendo utilizados no campo da arquitetura digital, especialmente os ligados ao conceito da morfogênese. Cita também o projeto generativo através de metáforas, apropriadas de obras como “On Growth and Form” de Thompson e “The Structure of Evolutionary Theory” de Gould. As apropriações apresentam-se como teorias da aplicação não mecânica dos conceitos evolutivos. Oxman (2006) cita que os sistemas evolutivos baseados na morfogênese produzem propriedades relacionadas à diferenciação e à heterogeneidade, as quais seriam as propriedades mais significativas do projeto digital, no entanto a autora não aprofunda no que consiste essas propriedades.

1.2.4 Classe dos modelos de desempenho

O projeto baseado no desempenho pode ser considerado um processo de projeto que tem como meta alcançar soluções que atingem um desempenho desejado. O resultado da forma é conseguido por tecnologias digitais que facilitam a geração de formas que culminam no bom desempenho do projeto. No modelo de desempenho podem ser usados, segundo Oxman (2006), uma técnica de formação ou um processo generativo. Esse modelo não é um simples método de avaliar o componente desempenho, mas sim a geração automática de uma forma que o atenda.

No processo de projeto baseado no desempenho, o projeto é gerado a partir de inúmeras simulações, com foco em encontrar o projeto com melhor desempenho ou um determinado comportamento. Oxman distingue esse processo em duas subclasses: formação baseada em desempenho e geração baseada em desempenho.

No modelo onde o desempenho é alcançado por formação, simulações digitais de forças externas dirigem o processo. O desempenho pode incluir questões ambientais, financeira, sociais, culturais, ecológicas ou tecnológicas. O projeto do edifício Greater London Authority Headquarters (2002) por Foster & Partners tornou-se o ícone desse processo, ao conciliar o desempenho acústico e térmico com a minimização da curvatura da superfície da fachada.

O emprego desse mesmo processo foi repetido pelo escritório Foster + Partners no edifício Swiss RE, conhecido como Gherkin, tendo sido aplicadas as

técnicas de desempenho ambiental, buscando aumentar os níveis de iluminação e ventilação natural, bem como a geometria do edifício foi proveniente da resposta a critérios aerodinâmicos do edifício de 180 metros.



Figura 10 - a) desempenho aerodinâmico da fachada; (FOSTER, 2002) b) Courtesy of London Organising Committee of the Olympic Games (LOCOG, 2002); c) Climate Camp (BULL, 2007)

O escritório Foster + Partners veiculou que o Gherkin foi “o primeiro edifício vertical ecológico de Londres”, logo o edifício tornando-se logo estudo de caso em livros e cursos sobre tecnologia de construção e projeto sustentável. O edifício passou a ser emblemático no potencial de inovação arquitetônica para reduzir o consumo de recursos e assim reduzir a probabilidade de mudanças climáticas alarmadas por algumas correntes ambientalistas (MASSEY, 2013).



Figura 11 - Greater London Authority Headquarters building(FOSTER, 2002)

No esquema usado por Oxman (2006) para ilustrar o modelo da formação baseada em desempenho, vemos que o componente de geração **não** possui relação

com o arquiteto. O desempenho, nesse caso, é o único a reger a geração e posteriormente a representação.

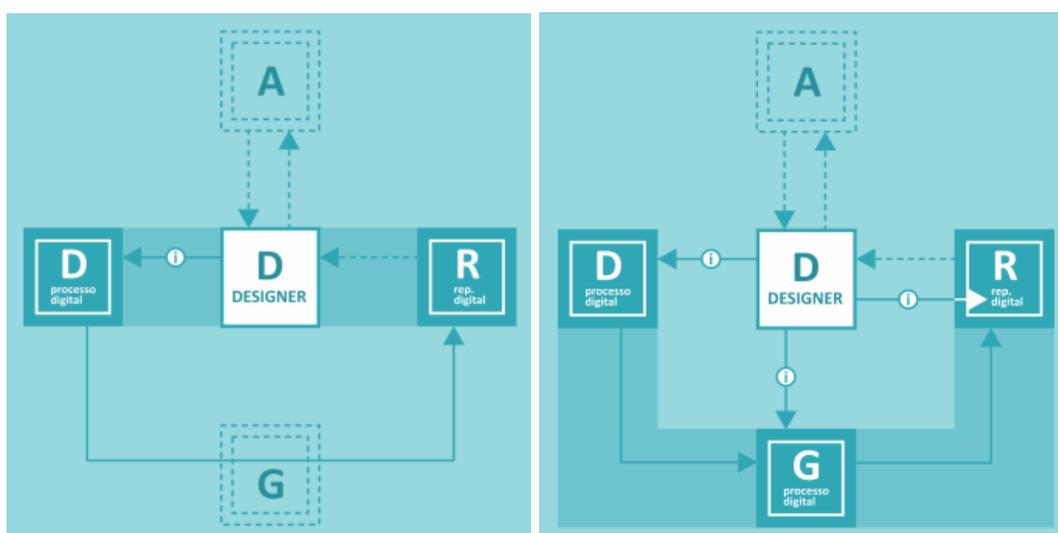


Figura 12 - a) formação baseada em desempenho b) geração baseada em desempenho (NOGUEIRA, 2013)

No esquema ilustrativo de Oxman, vemos que a principal diferença entre o modelo de desempenho por **formação** e por **geração** é a possibilidade de o arquiteto interagir no componente “geração”.

Usando o modelo de **geração** dirigido pelo desempenho, o processo continua integrado com o modelo de formação. A diferença está na intensidade com que as simulações regem a composição da forma. Nesse modelo as informações provenientes das simulações podem manipular e ativar comportamentos do sistema generativos, mas esses dados são visíveis ao arquiteto, podendo ele participar do procedimento de geração. Oxman diz que a carga estrutural do edifício pode ser considerada nesse modelo, mas não deixa claro por que esse critério de desempenho não pode ser explorado também no modelo de **formação** baseada em desempenho

1.2.5 Classe dos modelos compostos

O último processo de projeto apresentado por Oxman em sua estrutura de sucessiva complexidade é denominado classe do processo composto. Os processos compostos integram os componentes formação, geração, avaliação e desempenho. Oxman sugere o importante potencial em integrar os modelos, representando um futuro paradigmático de interação mútua, onde os dados e informações das atividades de cada componente do processo de projeto fluem em múltiplas direções, conectando todo o espectro de projeto.

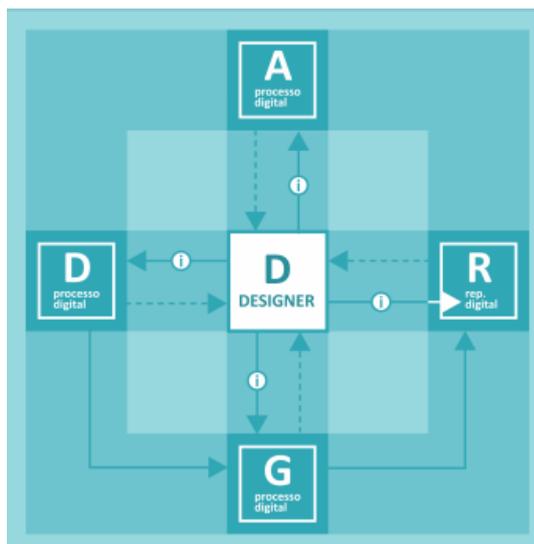


Figura 13 - Integração entre os componentes na ilustração da classe dos modelos compostos (NOGUEIRA, 2013)

Esse modelo representa uma nova visão filosófica da teoria da arquitetura digital, integrando os conceitos de não linearidade, interconectividade, continuidade, redes, dinamismo, diagramas, máquinas de projeção, etc. Um modelo que com base na filosofia de Deleuze, contempla em si as ideias de hiperconectividade e estruturas não hierárquicas de organização, conceitos que tiveram grande influência na construção da teoria e também da prática da arquitetura digital, vistos nos espaços contínuos e nos conceitos de ambientes com funções indeterminadas (Oxman, 2006).

Dentro do contexto do cruzamento disciplinar com ciências biológicas, Oxman relaciona conexões com teorias, como a teoria da complexidade, caos, emergência, teoria da catástrofe e biomimética.

Sobre a complexidade, Oxman aponta que, ainda que a dita arquitetura digital seja caracterizada por uma complexidade formal, a complexidade em si não é necessariamente uma característica definidora dessa arquitetura. Entretanto, ressalta que compreender o conceito da complexidade e acomodá-lo ao projeto é de suma importância para a arquitetura da segunda era digital.

1.3 Desenvolvimentos teóricos de Oxman na segunda era digital da arquitetura

Oxman, em 2006, propôs cinco classes paradigmáticas de processos de projeto digital. Cada uma dessas classes avança gradativamente em relação à classe anterior, quanto ao nível de integração entre as etapas do projeto. A **classe dos modelos compostos** é a mais avançada, seguida pela **classe dos modelos de desempenho**.

A *classe dos modelos compostos*, no entanto, parece ilustrar um esquema de um processo de projeto que ainda não é realidade, enquanto que a *classe dos modelos de desempenho* já possui exemplos palpáveis de sua aplicação. Talvez por esse motivo Oxman foque nesse processo de projeto no seu artigo seguinte.

Em 2008, Oxman abandona o esquema genérico com quatro componentes de projeto (geração, avaliação, desempenho e representação), usado em 2006 para ilustrar as classes paradigmáticas. O que é compreensível, uma vez que em 2006, a proposta foi construir uma teoria sobre a arquitetura digital com base nesses quatro componentes, que vêm da base de processo de projeto tradicional não digital.

1.3.1 Arquitetura do desempenho

Em seu artigo, Oxman (2008) aborda conceitos chave de aplicação do método, direções de pesquisa e usa um novo termo denominado arquitetura do desempenho (*performative-design*). Ao criar ambientes de simulação para o projeto arquitetônico baseado em desempenho, as capacidades generativas e de avaliação podem ser integradas nas simulações em busca do desempenho.

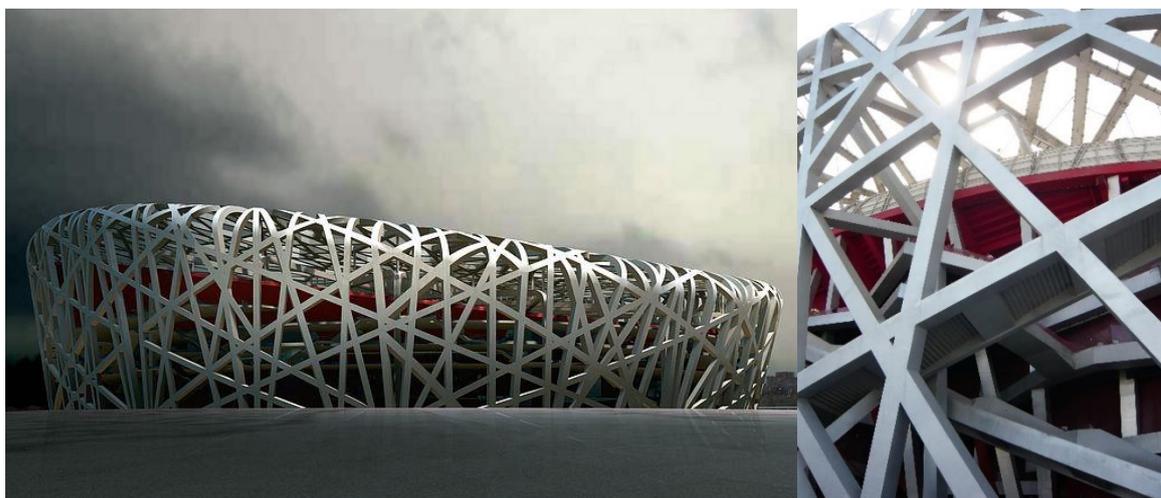


Figura 14 - Birds Nest, Beijing National Stadium a) modelo geométrico; b) performance estrutural do envoltório. (HERZOG & DE MEURON, 2008)

Oxman inicia o artigo explicando que o conceito de desempenho na arquitetura digital pode ser explicado como a síntese de duas características/ações essenciais ao projeto digital: **transformação** e **geração** de um modelo geométrico. Dando suporte a essas ações sobre o modelo geométrico, está a análise de avaliação do desempenho do edifício, possível por simulações de condições físicas como radiação solar e cargas estruturais. O uso do termo transformação é novo por Oxman, tendo essa ação não sido descrita pela autora em 2006.

O potencial do *processo de desempenho* reside na integração de procedimentos de simulação avaliativa com modelos de “geração da forma” e “modificação da forma”. A modificação da forma é processo que Oxman até então não havia detalhado. A autora utiliza também o termo *morfogênese de desempenho* (*performative-morphogenesis*) que, tal como a arquitetura da segunda era digital em geral, contempla a habilidade de “encontrar a forma” em oposição ao paradigma pre-digital de “propor a forma”. Um processo marcado pelo resultado inesperado e único (OXMAN, 2008).

Oxman (2008) coloca o questionamento de como e em que medida o arquiteto interage diretamente com os métodos de encontro da forma, como sendo o objeto de pesquisa preponderante na teoria da arquitetura digital contemporânea. Definições de como o modelo de projeto pode incorporar, desde os estágios iniciais do processo, o aspecto geométrico e fatores estruturais e materiais são também questões essenciais na definição do caminho de uma *morfogênese de desempenho*.

No artigo de 2008, Oxman diz que os sistemas de projeto digitais para arquitetura contêm três componentes que integram o apoio ao projeto: o *modelo geométrico (1)*, formulado de um modo que o torna capaz de transformar-se e gerar-se de acordo com dados de processos de avaliação; o *processo de avaliação (2)*, que pode ser integrado com o *modelo geométrico*, produzindo ações de modificação ou geração, podendo ser de um único critério (estrutural, carga solar, acústico) ou de múltiplos critérios e fatores de otimização; e o sistema que proporciona a *interação do arquiteto (3)* como um moderador dos diversos processos envolvidos ou como o desenvolvedor de modelos algorítmicos.

“The integration of these three components can be employed as a means to identify the current state of the art. In the past decade, the design of many significant architectural projects has been strongly influenced by computational performance simulations exploited in their form-finding processes. This has almost universally been the case with respect to various forms of structural and environmental analysis through which the engineering contribution to architectural design has become a both a characteristic of digital design and

a component of all advanced architectural projects.”⁶ (OXMAN, 2008, p. 4)

Oxman diz ser necessário, para o avanço do método, uma clarificação das fundamentações teóricas, bem como investir na pesquisa sobre as tecnologias e técnicas disponíveis. Nesse sentido, apresenta como exemplo a técnica conhecida como “auxílios de avaliação” remontando o início da era CAD.

É constatado por Oxman (2008) que as tecnologias disponíveis, em geral, não são capazes de integrar os dados provenientes das simulações de desempenho, diretamente na síntese do processo de formação. Esse fato faz deles sistemas **não morfogênicos**, que exigem o arquiteto como adaptador do modelo geométrico, para então acomodar os achados da avaliação e otimização.

Um procedimento típico de avaliação de desempenho estrutural, conhecido como *método de elementos finitos* (FEM), ilustra essa constatação. Sendo um método de simulação frequentemente aplicado, esse tipo de simulação exige um modelo geométrico bem definido previamente pelo arquiteto ou engenheiro. Somente com a comprovação da estabilidade estrutural do modelo, o desenho passa por uma otimização proposta pelo FEM, e é novamente gerado.

A partir desse ponto, as modificações do modelo podem ser alcançadas automaticamente por processos generativos controlados pelos achados numéricos da análise. O *projeto baseado no desempenho* é redefinido conceitualmente pela capacidade de manipular diretamente as propriedades geométricas de um modelo digital, com base em análises performativas para otimizar o desempenho. Oxman constrói um cenário explicativo, onde, ao invés de individualmente analisar o desempenho e modificar o projeto, será possível informar, gerar e modificar o projeto diretamente no processo de simulação.

Como projetos precedentes práticos - ao alcançarem contribuições significativas, tornaram-se ícones da arquitetura de desempenho e foco de extensiva análise profissional e acadêmica - Oxman destaca alguns casos onde: o desempenho ambiental foi o maior foco no processo; a modelagem, particularmente uma

⁶ A integração destes três componentes pode ser empregada como um meio para identificar o estado da arte da técnica. Na última década, o desenho de muitos projetos arquitetônicos significativos tem sido fortemente influenciado por simulações de desempenho computacional, exploradas em seus processos de encontro da forma. Essa tem sido quase que uma prática universal de análise estrutural e ambiental, na qual a contribuição da engenharia ao projeto arquitetônico tornou-se uma característica da arquitetura digital e um componente de todos os projetos arquitetônicos avançados. (tradução nossa)

interpretação do projeto paramétrico, foi definida como foco do procedimento; e casos onde tanto o processo paramétrico quanto o desempenho foram focos.

Os casos em que houve a preocupação mútua com o processo paramétrico associativo e com o desempenho ambiental constituem, na análise de Oxman, a maior contribuição ao campo. Oxman destaca os projetos *Greater London Authority Headquarters* (2002) e *Gherkin* (2004), ambos com projeto arquitetônico por Foster & Partners e engenharia por Arup Associates, e o edifício *Kunsthhaus* (2003) na cidade de Graz, com projeto arquitetônico por Peter Cook e Colin Fournier e engenharia por Bollinger and Grohmann.

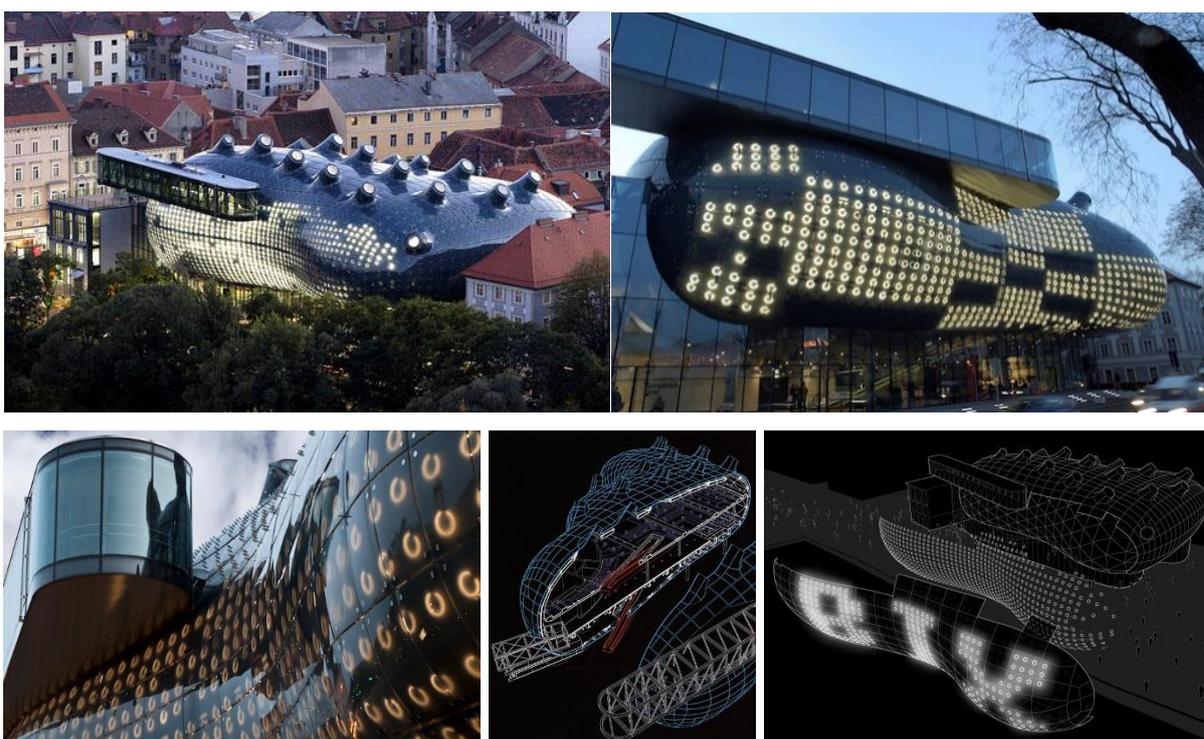


Figura 15 - Kunsthhaus, em Graz (COOK; FOURNIER, 2003)

Oxman passa a considerar fundamentais os sistemas de modelagem paramétricas, ao permitirem estabelecer esquemas de dependência e codependência entre os elementos do modelo geométrico, e por eles controlar o comportamento desses objetos, os quais, mesmo sob a ação de procedimentos de transformação, mantêm suas características topológicas.

Um dos atributos essenciais presentes na técnica de modelagem paramétrica é o que Burry (2003) chama de “meta-projeto”, ou modelo parametricamente variável. Burry explora esse princípio na formulação da geometria da Catedral da Sagrada Família, projeto de Gaudí pelo qual foi designado como arquiteto responsável.

Oxman considera o **controle algorítmico dos processos de variações paramétricas** (*algorithmic control of the processes of parametric variations*) uma das metodologias fundamentais dos sistemas de desempenho, uma vez que pode ser explorada como técnica de modificação do meta-modelo na procura de uma solução adequada. Oxman (2008) não menciona nesse artigo, mas esse sistema de busca na arquitetura é comum aos sistemas evolucionários.

O conceito de Burry é importante. Ele define o modelo geométrico, denominado por ele meta-modelo por conter esquemas associativos em nível geométrico que suportam as transformações topológicas importantes na busca da solução almejada.

Aish (2003), caminhando nessa mesma direção denomina de “modelo vivo” o modelo usado na interação do ambiente paramétrico com geometrias associadas. Oxman destaca o Specialist Modelling Group at Foster and Partners e o Smart Geometries Group (SG) como promovedores da tecnologia, métodos de projeto e do potencial educador desse campo.

A autora pontua que o conceito da morfogênese é o conceito chave no apoio à geração de forma por desempenho. E que sistemas generativos baseados em gramática e algoritmos genéticos são bem conhecidos da literatura científica, no entanto foram poucos os exemplos de sua aplicação em projetos arquitetônicos baseados no desempenho.

Como dificuldades presentes no estágio de desenvolvimento da época, Oxman (2008) relata que a necessidade de explicitar claramente os procedimentos, em um sistema generativo, dificulta a acomodação de uma vasta infinidade de problemas arquitetônicos. Além dessa, outra dificuldade é a necessidade do arquiteto como mediador, ainda não desvencilhada, o que culmina no questionamento de em que ponto o arquiteto deve intervir no processo de encontro da forma.

Oxman (2008) introduz o termo *versionificando* (*versioning*) – versão de versão – ou seja, criando versões em cima de versões, um termo operacional proposto para descrever as variações de um projeto.

O processo de otimização é abordado por Oxman, pela ótica de Kolarevic (2005). A otimização é o processo pelo qual é possível “substituir o uso convencional de ferramentas de análises para o uso de ferramentas de análise e síntese”, uma mudança em curso na arquitetura da segunda era digital.

Em um estudo de caso, Oxman (2008) explora: os meios de aplicar simulações como ferramenta generativa; a animação como a simulação que determina a geração da forma; e as condições geométricas que suportam a geração automática da forma.

Oxman propõe, com base em Lynn (1999), o emprego da animação como gerador da simulação e da forma usando o software 3DS MAX para simular as reações de uma superfície a efeitos dinâmicos de vento e luz. Depois foi tentado simular as duas forças simultaneamente. Analisando que foram usados nas simulações os princípios físicos de **força** e **movimento**, Oxman considerou que o resultado do experimento sugere que a técnica pode ser usada como referência, particularmente para sistemas dinâmicos.

Em um outro artigo publicado por Oxman em 2008, focando os aspectos educacionais da teoria da arquitetura digital, ela refere-se aos processos de projeto tal como apresentados em 2006. Usa um novo esquema para ilustrar a comparação entre o processo cíclico convencional e o processo iterativo.

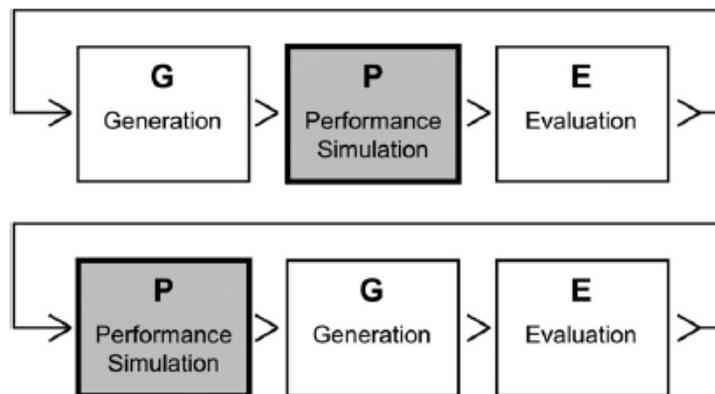


Figura 16 - a) Geração – simulação de desempenho – avaliação; b) simulação de desempenho - geração – avaliação. (OXMAN, 2008)

1.3.2 Tectônica digital

Em 2010, Oxman escreve um artigo com a intenção de explorar a *tectônica digital* inserida no processo de morfogênese. A tectônica, no sentido abordado no artigo, é o conceito que define a natureza da relação entre a arquitetura e suas propriedades estruturais. A autora explica que mudanças na definição da simbiose entre arquitetura e engenharia estrutural ao longo da história causaram influência na evolução do conceito de tectônica. A chamada tectônica digital surge da integração entre estrutura, material e forma no ambiente digital.

Oxman (2010) classifica três métodos tectônicos de encontro da forma em arquitetura: **estrutura primeiro**; **material primeiro**; e **forma primeiro**. Cada um desses métodos pode ser visto como metodologias de projeto distintas.

Oxman cita a importância da lógica de Gottfried Semper *Four Elements of Architecture*, de 1851, cujo emprego pode ser útil hoje para distinguir a massa construída do esqueleto estrutural e o de envoltório.

O uso de modelagem física de Gaudí (1852-1926) é considerado como a introdução do método de experimentação de busca de forma como um processo de projeto. Em outras palavras, ele pode ser considerado como tendo contribuído para o surgimento de um método de tectônica estrutural. Em tal método, a modelagem em escala permitiu o estudo da influência estrutural, causada por mudanças das relações tectônicas. Gaudí foi o primeiro arquiteto a utilizar modelos em escala para experimentação com propósito de projeto, tendo as curvas catenárias sido usadas para gerar formas de estruturas livres de forças físicas de tensão.

Frei Otto expandiu essas relações clássicas entre a forma e a estrutura em sua abordagem experimental pioneira, orientada para a pesquisa do *encontro da forma estrutural* com base no material a ser utilizado. Diferente dos modelos da curva catenária de Gaudí - que focavam no encontro de uma forma estática e estável – os modelos de Otto objetivavam tanto o comportamento estrutural quanto o material. Para tanto, os seus modelos analisaram cientificamente cabos, cordas, correntes, sabão, filmes, borracha, tecidos e malhas de aço. Entre os métodos empregados por Otto, os principais foram o de estrutura com cabos e membranas, e o de superfícies mínimas.

Esses estudos de caso históricos da modelagem tectônica têm relevância como precedentes para abordagens de modelagem de simulação atuais em tectônicas digitais. Assim, a transição da modelagem do comportamento do material de modelos analógicos para modelos digitais é uma fonte da modelagem digital contemporânea e de sua integração ao projeto.

As primeiras tentativas de definir a tectônica digital passam pelos conceitos de *fazer a forma (form-making)* (BEESLEY, 2000) e *construção da forma (form-construction)* (LIU e LIM, 2006). Montar uma *materialidade virtual* tornaria a *tectônica digital* uma *promovedora da materialidade* análoga ao processo físico de encontro da forma. (OXMAN, 2009).

Os três métodos tectônicos classificados por Oxman como processos de encontro da forma em arquitetura - **estrutura primeiro**, **material primeiro** e **forma primeiro** – estão ligados de maneiras diferentes ao conceito de auto-organização.

Ao buscar definir primeiramente a estrutura (*structure-first*), o ponto de partida pode ser o uso de rede de cabos, membranas, domos, conchas, látices bi e tri dimensionais e estruturas ramificadas. As variáveis desse processo são o número e a localização de elementos de suporte. Esse método é caracterizado por modelos tipológicos racionais.



Figura 17 - Structure first: localização dos apoios nas maquetes de Frei Otto (OTTO, 1967)

Ao ter como ponto de partida o material, é preciso primeiramente selecionar o material a ser usado no processo. Oxman cita o uso de bolhas de sabão como exemplos clássicos desse processo.

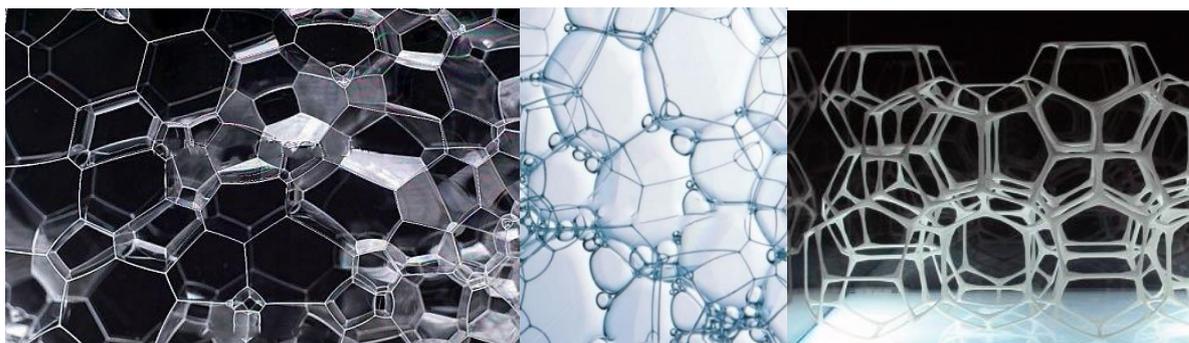


Figura 18 - Material first: O material é o principal definidor do encontro da forma (CCDI PTW, 2003)

Partindo da forma em si, para encontrar a tectônica, tem-se como princípio que os elementos estruturais e o material devem se acomodar à forma previamente estabelecida. Esse processo acontece quando certos fatores geométricos são estabelecidos como ponto de partida. O projeto Mannheim Multihalle de Frei Otto pode ser visto como o principal exemplo não digital desse processo.



Figura 19 - Mannheim Multihalle (OTTO, 1972)

O surgimento da forma a partir do conceito de auto-organização, por um desses três modelos de **encontro da forma** propostos por Oxman (2010), fundamenta o aspecto tectônico morfogênese digital.

1.3.3 Morfogênese digital

O termo "morfogênese" representa um conjunto de conceitos-chave relevantes para a teoria e os métodos de design digital (HENSEL et al., 2006). A morfogênese digital corresponde ao conjunto de métodos e técnicas relacionadas com os formalismos da tectônica digital.

Segundo Oxman (2010), os principais conceitos da morfogênese vêm do campo da biologia do desenvolvimento. Princípios de ordem estrutural e material da biologia e ciências naturais compõem também os princípios biomiméticos. A estrutura natural pode ser empregada como a base para a definição de geometria, padrões, forma e comportamento.

Oxman (2010) define com maior clareza o conceito de *emergência* (*emergence*), ou surgimento. Na definição clássica de Holland (1992) a *emergência* está relacionada com o fenômeno e os efeitos da *relação da parte com o todo* (*part to whole relationships*) – local para global – e *processos de baixo para cima* (*bottom-up-process*). Segundo Holland, o comportamento do todo é mais complexo do que o comportamento da parte e, portanto, o efeito no todo não pode ser compreendido através das partes. Por isso, na biologia do desenvolvimento, o conceito de emergência fornece explicações para a evolução dinâmica e o crescimento dos sistemas naturais.

No processo evolutivo adaptativo, produzindo transformações evolutivas, o processo resulta em comportamentos e sistemas complexos. O conceito é importante para a arquitetura a partir da reflexão sobre a demonstração de Thompson no campo da biologia do desenvolvimento. Thompson usa a topologia para demonstrar comparativamente as relações de morfogênese entre subespécies (OXMAN, 2010).

Os princípios da morfogênese contribuíram para o desenvolvimento de modelos, metodologias e técnicas digitais. Alguns são descritos como sistemas algorítmicos, através da definição de regras (*Rule Based Design - RBD*). Entre os mais comuns estão o L-tree (Lindenmayer), o Voronoi, o Cellular Automa e os fractais.

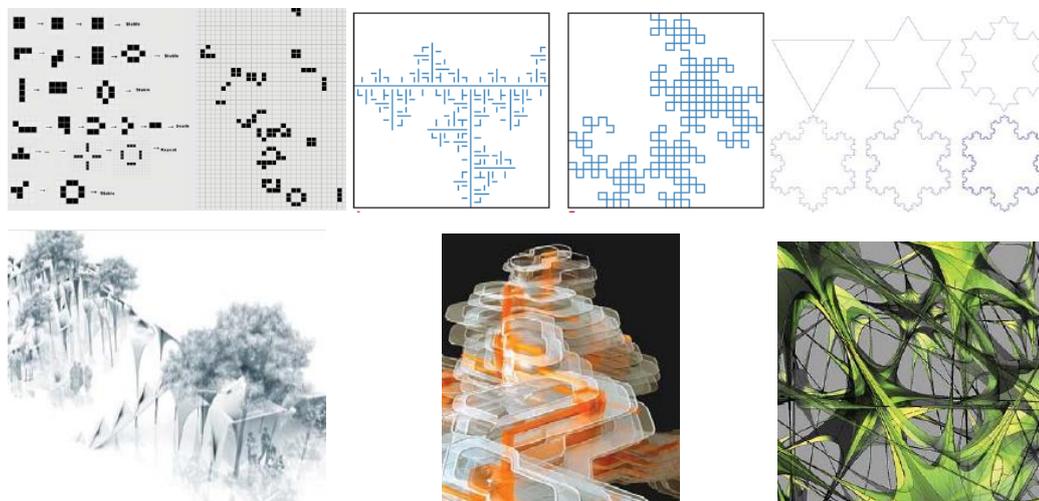


Figura 20 - Esquerda: celular automa. Centro: L-tree. Direita: Fractal. Abaixo: respectivos exemplos do uso em arquitetura. (FORNES; HANSMEYER; WILLIS)

Um outro conceito que permeia a morfogênese, esclarecido por Oxman, é o da **auto-organização**. É o que define como ocorrem os princípios de ordenamento nas adaptações e as mudanças dos processos evolucionários adaptativos. Explica: “A auto-organização (em modelos tectônicos digitais) permite a busca de forma como resposta à força, relacionada ao contexto funcional e físico” (OXMAN, 2010).

Sobre a aplicação dos conceitos biológicos a arquitetura, Oxman, relata que isso ocorre dentro de um sistema tectônico digital, por meio da topologia:

“Part and whole relationships and self-organization are characteristic behaviors of a tectonic system. In digital morphogenesis, these behaviors must be considered in the formulation of a digital tectonic system. Topology is the medium which enables the adaptive behavior of a digital tectonic system. That is, the formulation of elements and their topological relationships is essential in digital morphogenesis.”⁷ (OXMAN, 2010, p. 5)

⁷ Relações da parte com o todo e auto-organização são comportamentos característicos de um sistema tectônico. Na morfogênese digital, esses comportamentos devem ser considerados na formulação de um sistema tectônico digital. A topologia é o meio que permite o comportamento adaptativo de um sistema tectônico digital. Ou seja, a formulação de elementos e suas relações topológicas é essencial na morfogênese digital. (tradução nossa)

Oxman menciona a possibilidade de usar a tectônica digital como uma ferramenta da morfogênese. Como exemplo cita a **tectônica têxtil** de Spuybroek, "em que os tecidos são transformados (digitalmente) em tectônicas, através de técnicas têxteis convencionais - tecelagem, agrupamento, entrelaçamento, trança, tricô ou nó" (SPUYBROEK, 2006 apud OXMAN, 2010). Esse é o início da chamada **computação material**.

Nesse sentido, os elementos tradicionais do design estrutural, como lajes, vigas, cúpulas, etc., não podem mais ser utilizados como modelo para o projeto de estruturas complexas, e os modelos personalizados com scripts digitais devem ser desenvolvidos com base no projeto. A **morfologia estrutural** é o conjunto de conhecimento por trás da tectônica digital. "Os sistemas topológicos superam as limitações dos modelos tradicionais e tipológicos. Portanto, os modelos paramétricos e generativos associativos topológicos são a base da maioria dos processos morfogênicos no projeto" (OXMAN, 2010).

Sobre o uso da morfogênese digital na engenharia estrutural, Oxman cita o trabalho de alguns arquitetos, desenvolvidos juntamente com técnicas de otimização estrutural, por Sasaki:

"One of the recent applications of this approach in architecture is found in the design engineering work of Mutsuro Sasaki (Sasaki, 2007). Sasaki has worked with Arata Isozaki, Toyo Ito, Kazuyo Sejima and other leading Japanese architects. Sasaki has recently employed two techniques: the first is the Sensitivity Analysis Method. The original method was based on the hanging model experiments employed by Gaudi and Heinz Isler to define the shape of free-form funicular surfaces. In this approach the final shape was modified and analyzed in an iterative process. The new digital version of this method is termed: Shape Design Method using Sensitivity Analysis. It employs principles of mechanical theory that minimize surface energy in the internal structure of a freely-curved surface."⁸ (Oxman, 2010, p.7)

⁸ Uma das aplicações recentes desta abordagem em arquitetura é encontrada no trabalho de Mutsuro Sasaki (Sasaki, 2007). Sasaki trabalhou com Arata Isozaki, Toyo Ito, Kazuyo Sejima e outros arquitetos japoneses de destaque. Sasaki empregou recentemente duas técnicas: o primeiro é o Método de Análise Sensitiva. O método tradicional baseou-se na experiência modelo suspenso empregado por Gaudi e Heinz Isler para definir a forma das superfícies funiculares de forma livre. Nesta abordagem, a forma final foi modificada e analisada em um processo iterativo. A nova versão digital deste método é denominada: Método de Design de Forma usando Análise Sensitiva. Ele emprega princípios da teoria mecânica que minimizam a energia superficial na estrutura interna de uma superfície livremente curvada. (tradução nossa)

O método tradicional de otimização estrutural evolutiva (ESO) foi usado por Toyo Ito no projeto Island City Central Park (2005). Para gerar a forma final, o método de *modificação da forma* (*shape modification*) modifica suavemente a forma inicial, alcançando um comportamento mecânico mais eficiente.

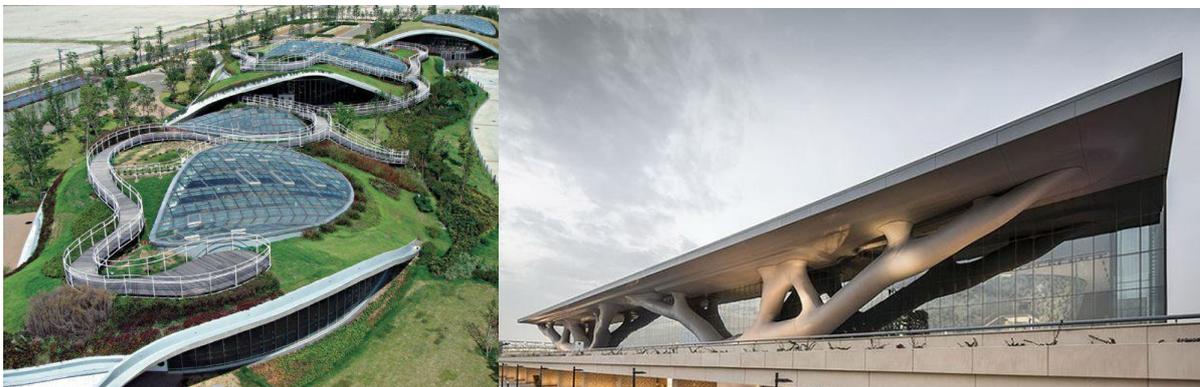


Figura 21 - a) Toyo Ito (2005) b) Arata Isozaki (2003), morfogênese por otimização estrutural.

Oxman menciona que a técnica denominada **extensão tridimensional da otimização estrutural evolutiva** (*3D Extended Evolutionary Structural Optimization*) está ampliando o método de **otimização estrutural evolutiva** (*Evolutionary Structural Optimization*) tradicional. A nova versão desse método gera uma forma estrutural racional. O método estendido emprega um processo evolutivo que pode ser aplicado a uma estrutura tridimensional. Esse método foi usado no edifício do Qatar Education City Convention Center (2003), projetado por Arata Isozaki (Oxman, 2010).

1.3.4 Arquitetura evolutiva e morfogênese

A obra *An Evolutionary Architecture* do arquiteto John Frazer (1995) faz analogias com processos da natureza de evolução e de morfogênese. Sendo um termo inicialmente aplicado no campo das ciências biológicas, morfogênese refere-se ao uso da lógica de geração da forma e de produção de padrões em um organismo vivo, mediante processos de “crescimento e diferenciação”.

Proposta pelo arquiteto John Frazer, a arquitetura evolutiva apoia-se no conceito de algoritmos genéticos, unindo principalmente estas três disciplinas: arquitetura, computação e biologia. O cientista da computação e doutor em computação evolutiva aplicada ao design Peter Bentley desenhou um diagrama das inter-relações das áreas de conhecimento desta pesquisa.

Segundo Nascimento (2014), os algoritmos criam mecanismos de adaptação entre elementos distintos, mantendo a sua performance e organização com inspiração nos sistemas biológicos, nos quais populações distintas são combinadas e

selecionadas “naturalmente”, por meio de mutações calculadas de forma aleatória e outros fenômenos.

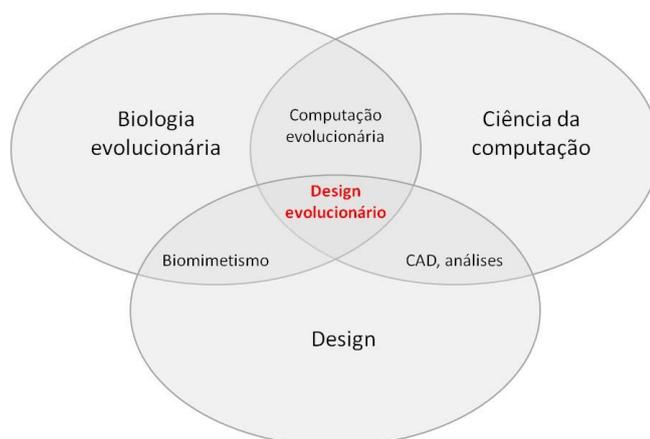


Figura 22 - Representação em diagrama das relações interdisciplinares propostas por Peter Bentley (NASCIMENTO, 2014)

Os modelos generativos de algoritmos genéticos vêm sendo adaptados para terem a sua aplicação ampliada a várias metodologias, podendo a parametrização e a modelagem de superfícies topológicas surgir integradas como parte desse processo.

Nos diferentes casos, a função do algoritmo é sempre a de encontrar a melhor solução. A quantidade de decisões tomadas pelo algoritmo passa a possuir um nível de importância no resultado final do projeto, que varia de acordo com o projeto específico. A metodologia de projeto utilizada pode então limitar ou ampliar a função do algoritmo genético, permitindo maior ou menor controle do arquiteto sobre o resultado final.

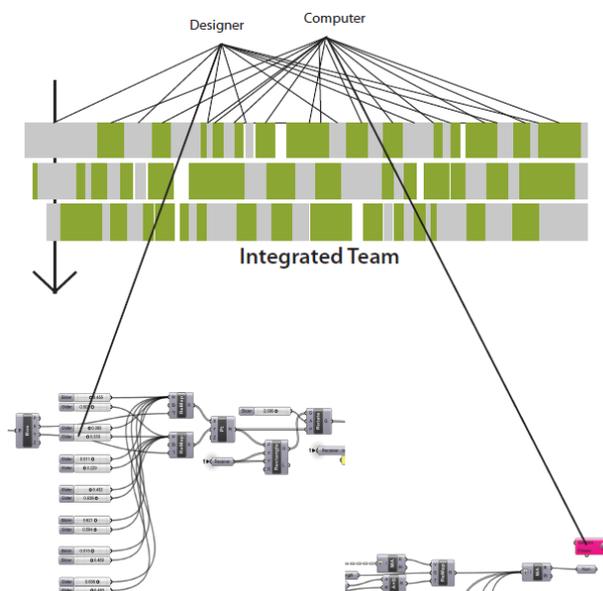


Figura 23 - Mapeamento das decisões do arquiteto (cinza) e do algoritmo evolutivo (verde) no processo de projeto de Nathaniel Holland, (HOLLAND, 2011)

O modelo evolucionário em arquitetura se apropria de técnicas de geração de formas encontradas nos seres vivos na natureza. A geração de forma, no modelo evolucionário, é derivada de uma codificação, um processamento de dados inspirado na genética de sistemas biológicos, pela qual o projetista insere as informações que resultam em um processo de geração sequencial de projeto, considerando-os evoluídos na medida em que se aproximam da solução ideal almejada pelo projetista.

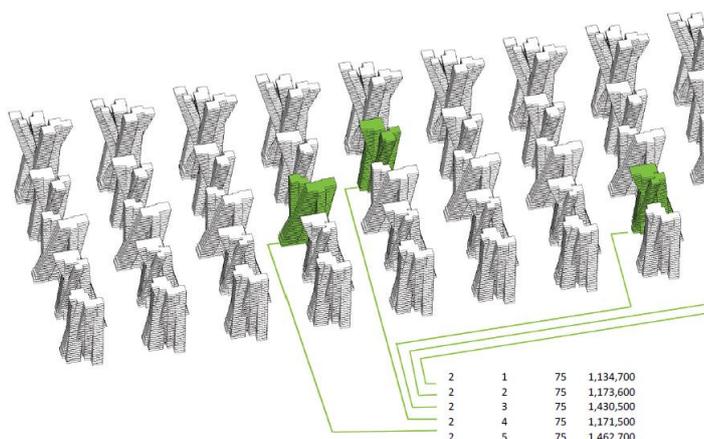


Figura 24 - População de edifícios. Os indivíduos com melhor desempenho (verde) avançam para a próxima etapa de cruzamento genético. Nathaniel Holland, (HOLLAND, 2011)

Segundo a teoria da evolução de Darwin, apenas os organismos mais adaptados ao seu ambiente tendem a sobreviver e a transmitir suas características genéticas em números crescentes para gerações sucessivas, enquanto as menos adaptadas tendem a ser eliminadas (NIRAULA, 2010).

Esse mesmo conceito rege a Arquitetura Evolucionária, onde os indivíduos – neste caso edifícios – que melhor atenderem as demandas de projeto especificadas pelo arquiteto serão selecionados para a próxima etapa de processamento de informações. O Algoritmo Genético mantém a população de indivíduos – neste caso grupo de edifícios - candidatos aptos a solucionar o problema ou pré-requisito disposto pelo arquiteto, e os evolui aplicando iterativamente um conjunto de operadores probabilísticos-estocásticos.

A cada etapa de processo evolucionário, um novo potencial generativo é incorporado ao indivíduo que melhor atendeu à expectativa desejada na etapa anterior. O indivíduo (objeto arquitetônico com melhor performance) é então selecionado e cruzado com um novo algoritmo para incorporar novos potenciais projetuais. Esses potenciais podem ser classificados em quatro categorias principais de performance: otimização (custos, estrutura, circulação); espacial (tamanho, relação com o espaço público); ambiental (solar, ventilação, uso energético, coleta de água,

luz natural etc.); projetual (iluminação natural, vistas, inovação, propriedades materiais, dimensionamento) (HENSEL et al., 2006).

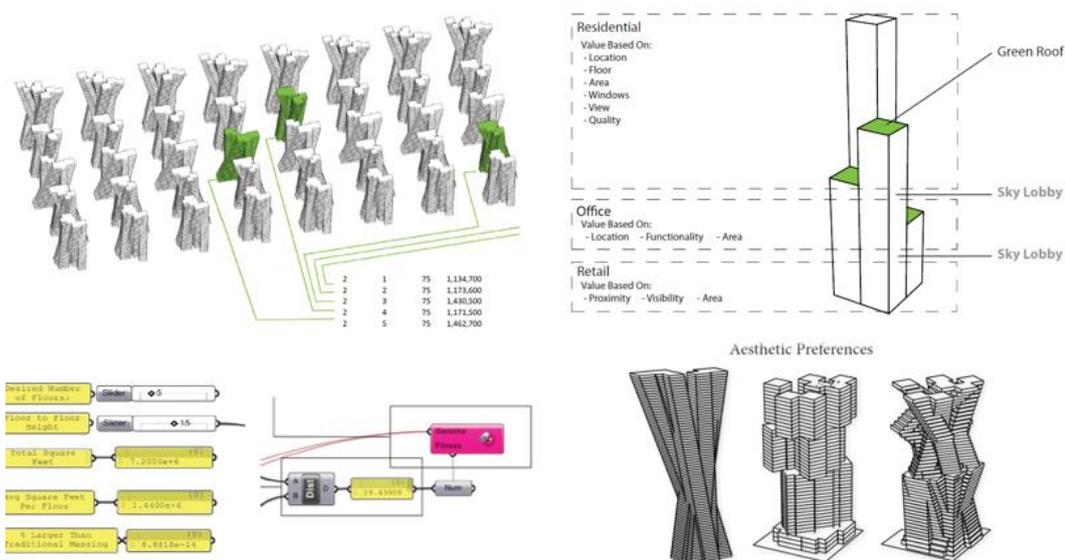


Figura 25 - Modelo evolucionário utilizado por Nathaniel Holland, (HOLLAND, 2011)

Entender a relação entre o produto final desejado e o algoritmo genético se torna o fundamento principal para estabelecer metas projetuais que, desde o princípio estejam em consonância com o projeto a ser gerado. Para facilitar o uso dessas ferramentas por arquitetos, os softwares de modelagem paramétrica incorporam ferramentas de “programação visual”. Ou seja, uma interface gráfica que torna a programação de lógicas computacionais mais intuitiva.

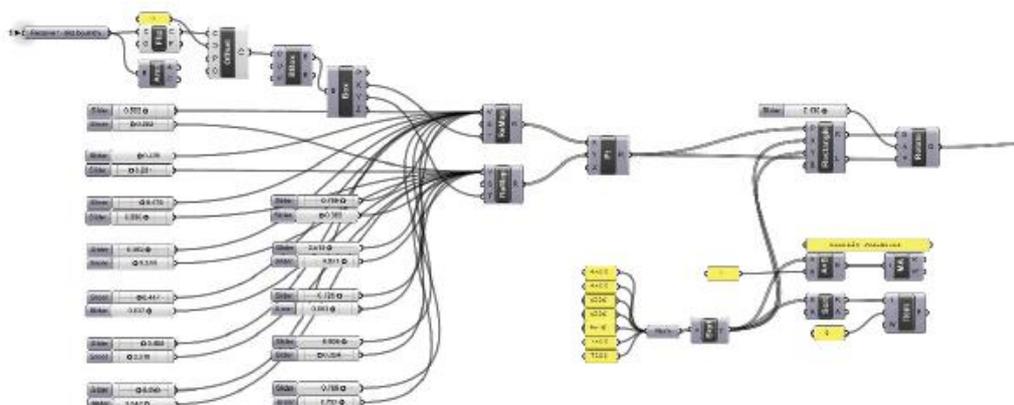


Figura 26 - Interface de programação visual paramétrica da ferramenta Grasshopper no software Rhinoceros, (HOLLAND, 2011)

Os principais desafios no uso dessa ferramenta estão: na definição do que se busca solucionar; nos dados que poderão ser alterados pelo mecanismo na busca da forma ideal; e na especificação clara e objetiva do que é um resultado satisfatório.

Nesse sentido, a importância de uma intencionalidade bem definida é para Frazer (2012) o aspecto mais relevante da arquitetura evolucionária.

O arquiteto busca otimização de projetos e sistemas e a evolução de modelos que tenham melhor desempenho. O resultado desse processo de projeto passa a ser uma imitação de mecanismos genéticos de seleção natural que, por sua vez, de acordo com Stephen Gould em seu trabalho *The Structure of Evolutionary Theory* (2002), é quase que exclusivamente o único mecanismo de adaptação evolutiva.

1.4 Os novos caminhos da teoria e prática na arquitetura contemporânea

Segundo Carpo (2017), exige-se o esforço de historiadores, matemáticos e filósofos, para tentar explicar como e por que uma revolução cultural e tecnológica, marcou os estilos arquitetônicos de uma época iniciada no Blob e hoje embasada tanto tecnicamente quanto estilisticamente no parametricismo.

Como precedente dessa fase, destaca-se a ideia da customização em massa pela fabricação digital, uma sugestão pela qual os arquitetos merecem crédito por terem desenvolvido, testado e conceitualizado em algumas escolas na Europa e Estados Unidos nos anos noventa (CARPO, 2017).

Carpo (2017) menciona que, pela primeira vez na era digital, a sociedade de modo geral tem mais dados do que precisa. E essa quantidade de dados sem precedentes passa a ser de difícil gestão, atingindo as relações pessoais. Parece que a arquitetura contemporânea também foi apanhada de surpresa e ainda não tomou ciência de todas as possibilidades desta era.



Figura 27 - Simulações de movimento (GREMMLER, 2016)

Segundo Schumacher (2017), o parametricismo é a resposta arquitetônica mais adequada “em um mundo cada vez mais dinâmico e complexo, onde as instituições sociais, os tipos sociais e as identidades proliferam, se hibridam e, de fato, parecem se misturar, em uma textura social continuamente diferenciada”.

A complexidade acontece no nível da geometria e dos detalhes de projetos possíveis apenas se submersos, ainda que temporariamente, na virtualidade. E acontece também nas associações entre correntes arquitetônicas e fusões nos processos de projeto. A possível relação entre morfogênese, biomimética, arquitetura responsiva, e o uso de fabricação digital e sistemas físicos-cibernéticos na arquitetura parte do pressuposto de que os processos de projeto, que envolvem sistemas generativos e a multifuncionalidade proveniente da biomimética, estão entre os produtores de geometrias mais complexas, portanto de mais difícil execução.



Figura 28 - a) Phaeno Science Centre, (ZHA, 2005); b) Zaha Hadid Architects CODE, Experimental Pavilion for Beijing Biennale, (ZHA, 2013)

Nas obras de projetos mais complexos há grande presença da fabricação digital, como as obras como a do Museu Louis Vuitton, de Frank Gehry que contam com mais de 10.000 componentes fabricados digitalmente. A construção civil, como presente na era da informação e velocidade, está envolvida pelas necessidades de se encaixar nos moldes da rápida produção. E essa velocidade e precisão não são alcançadas no modo de construção tradicional. Quanto mais complexo o resultado do projeto realizado por sistemas generativos, mais provável será a necessidade de utilização de tecnologia digital na construção e fabricação e montagem dos componentes. É comum observar que mesmo o termo construção vem se tornando obsoleto, em um universo onde “fabricação” e “montagem” fazem mais sentido.

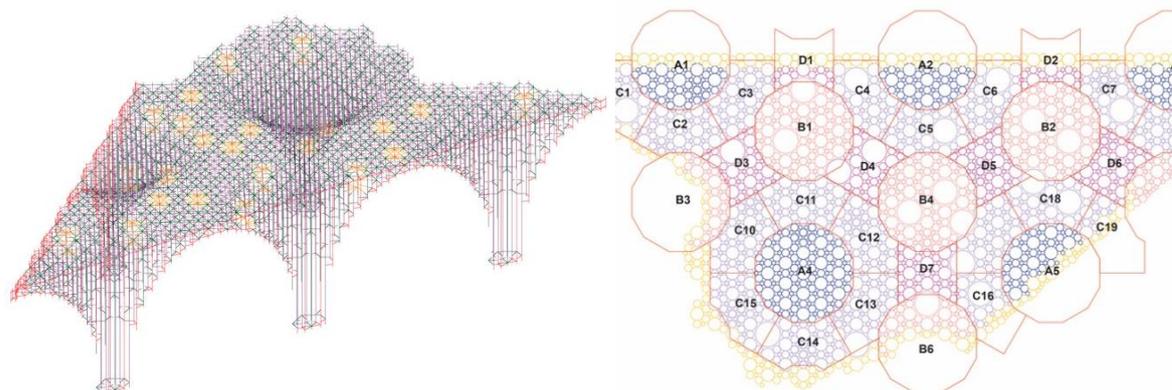


Figura 29 - pavilhão de cilindros acrílicos projetado para a Bvlgari (NANA ARCHITECTS, 2013)

Tomemos como exemplo o pavilhão de cilindros acrílicos projetado para a Bvlgari pela NaNa Architects. O processo que gerou o projeto foi calculado no software Grasshopper, apresentando inúmeros cilindros. Não basta que os cortes tenham sido feito por fabricação digital CNC; a montagem também se torna mais complexa, necessitando de códigos de barras e scanners para uma montagem mais efetiva. É a construção com “pontos de nuvem”, cujo método demandou pesquisas para a sua formulação e se classificou como uma barreira na materialização de obras com elevado número de componentes durante certo período.

Uma obra como essa mesmo que impraticável, poderia ser realizada manualmente, mas há casos em que o projeto assume uma complexidade que torna esse exercício impossível.

Hoje, a maior parte do uso de padrões da natureza em edifícios é restrita a elementos específicos da edificação, como um envoltório ou uma fachada, não se fazendo presente na concepção do edifício como um todo. O padrão matemático representado na fórmula de “Voronoi”, por exemplo, é amplamente utilizado na arquitetura de morfogênese. Como exemplo, tem-se o envoltório do Centro Aquático

Nacional de Pequim, projetado pelo escritório PTW Architects para as Olimpíadas de 2003.



Figura 30 - Beijing National Aquatics Center, (PTW ARCHITECTS, 2010)

O padrão “Voronoi”, da planta *Coleochate Orbicularius*, foi utilizado pelo arquiteto Stanislav (2009) por meio de um modelo computacional de seu crescimento, em uma proposta para envoltório. Um novo entendimento no uso de métodos generativos baseados em desempenho propõe que o objeto arquitetônico seja eficiente em múltiplos requisitos, já que inicialmente o uso do algoritmo como método de busca por desempenho focava um único aspecto.

Hensel (2006) explica essa dicotomia mostrando que sistemas de vida natural usam processos de “crescimento e diferenciação” e não “otimização e padronização”. A crítica de Hensel (2006) incentivou o aparecimento de um novo modelo de processo de projeto, desta vez análoga ao processo evolutivo de Gould (2002), pelo qual o objeto arquitetônico é submetido a múltiplas etapas de evolução pontual, cada uma por meio de um novo processo generativo, que não é necessariamente um processo generativo baseado em um processo biológico.

Michael Pawlyn (2010) justifica a adoção de padrões da natureza através da biomímica. Segundo ele a natureza possui bilhões de anos de evolução, que nos proporciona um catálogo de soluções eficientes, com eficazes níveis de adaptabilidade e economia de recursos que se fazem necessárias às soluções de arquitetura.

No projeto do Eden Project, ele mostra como as ideias aplicadas da biologia levaram a uma eficiente estrutura de cobertura do edifício. O objetivo foi alcançado com o uso de um polímero de alta resistência, que possibilitou elementos de tamanhos maiores que o vidro. Por ser também mais leve, esse elemento diminui a necessidade de estruturas robustas de sustentação, utilizando muito menos aço. Os benefícios

foram múltiplos, já que, com menos aço, há maior penetração de luz e, com menos peso conseguem-se economias desde a fundação estrutural do edifício.



Figura 31 - Eden Project po Michael Pawlin (PAWLIN, 2010)

É possível atualmente observar uma “segunda era digital” na arquitetura que, através do robô, expressa sua contemporaneidade e demonstra seu potencial de prosperidade. Hoje é possível que a programação computacional e a construção arquitetônica sejam condicionadas mutuamente, sendo a reciprocidade físico-digital um aspecto fundamental, capaz de transformar o digital em concreto e tangível (GRAMAZIO e KOHLER, 2013).

Construir com robôs leva a arquitetura a projetar processos formativos. Na computação material, dados sobre o material construtivo, programação e construção são entrelaçados de forma que a lógica algorítmica do computador é diretamente conectada com a realidade material da arquitetura construída. Torna-se possível, então, intervir diretamente no processo de materialização, e o formula-lo de acordo com os critérios do desenho arquitetônico (GRAMAZIO e KOHLER, 2013).

Os Sistemas de fabricação Físicos-Cibernéticos são citados por Achim Menges (2015) como uma nova forma de fazer arquitetura, uma “Construção computacional”. Segundo Menges, o que é referido em outros campos como a “quarta revolução industrial” deve impactar significativamente na arquitetura, possivelmente a deslocando de uma fabricação com bases em instruções para uma fabricação com base em comportamentos físicos.

A base para esse método é o monitoramento em tempo real do processo de materialização física da arquitetura. Com a implementação de sensores capazes de captar e processar o mundo físico, os robôs ganham independência dos direcionamentos rígidos de um arquivo digital de movimento pré-programado. Nesse novo método, o projeto e construção não são totalmente previamente determinado no

ambiente digital, mas se amoldam à medida que a materialização vai tomando forma (MENGES, 2015).

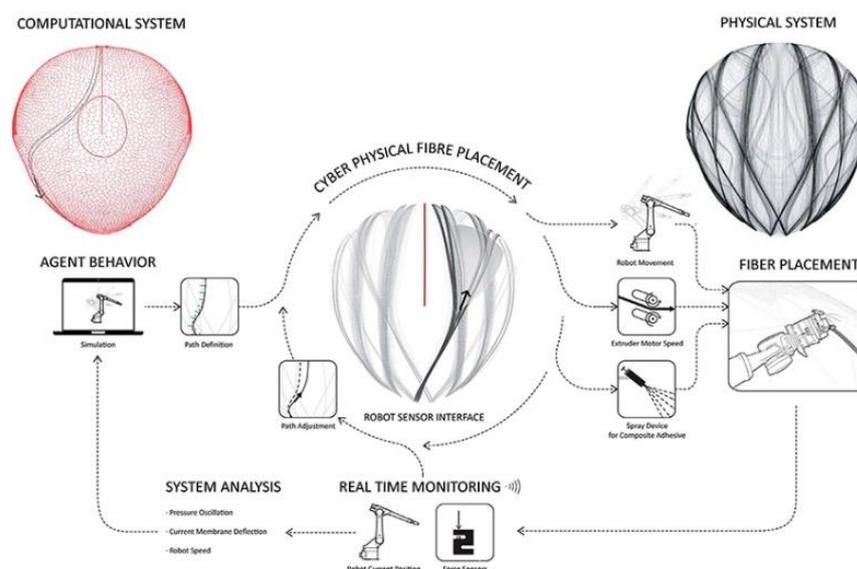


Figura 32 - Esquema de monitoramento do processo construtivo em tempo real (ITKE, 2015)

A integração do sistema físico com o sistema computacional de um mesmo projeto acontece com o uso de sensores que informam ao sistema computacional como de fato se realizou a materialização prevista digitalmente. Em caso de divergência entre o digital e o físico, os desvios detectados pelos scanners a laser durante a execução se tornam dados que proporcionam ajustes em tempo real no modelo digital, para que haja correção dos desvios necessários à correta materialização (MENGES, 2015).

É preciso identificar se o que Achim Menges chama de sistemas de produção físico-cibernéticos trata da mesma reciprocidade à qual Gramazio e Kohler se referem ao afirmar existir condições mútuas entre a programação computacional e a construção arquitetônica; e que relação existe entre esses sistemas de materialização digital e a “Computação Material”, abordada por Achim Menges (2014) e utilizada como base por Neri Oxman (2014) ao propor a “programação da matéria”.

A visão que Gramazio e Kohler (2013) possuem, sobre o uso de ferramentas digitais para manipulação de materiais pode se dar de duas formas: a primeira é a explícita manipulação externa de um material por um robô, a exemplo do corte de um tronco a uma determinada medida; a segunda forma de manipulação é implícita às propriedades específicas do material, como, por exemplo, calcular digitalmente a expansão de uma espuma de poliuretano. Essa segunda forma de

manipulação das propriedades de um material apresenta relação com a “computação material”.

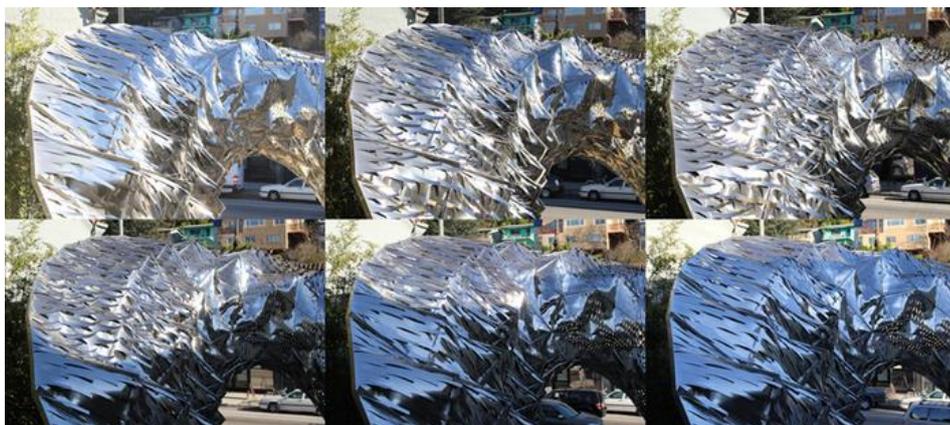


Figura 33 - Contração e expansão de folhas metálicas no Bloom Canopy Project, por Doris Sung (SUNG, 2012)

As formas de “computação material” que veremos a seguir não contam com análises em tempo real, como visto nos sistemas construtivos físico-cibernéticos de Menges, mas sim com o conhecimento prévio do comportamento do material sob diferentes situações. O conhecimento prévio é obtido por experimentos, e uma integração do conhecimento desse comportamento se faz na elaboração do projeto.

O uso da “computação material” no processo de projeto pode se dar com o cômputo de dados do material como limitante de formas possíveis, como, por exemplo, a análise da resistência da madeira a dobra, usada no projeto do pavilhão de pesquisa conduzido pelo ICD/ITKE em 2010 (FLEISHMANN et. al, 2014).



Figura 34 - Computação material aplicada ao processo de projeto (ICD/ITKE, 2010)

Outra forma de computar as propriedades do material no processo de projeto é incorporar ao projeto a capacidade do material de responder a estímulos climáticos. A capacidade de resposta do material foi usada em diversos experimentos realizados por Reichert e Menges entre 2008 e 2012, cuja finalidade dos estudos foi

desenvolver elementos arquitetônicos que respondam a variações climáticas, dispensando o uso de equipamentos mecânicos ou eletrônicos. A madeira pode absorver água, que quimicamente se liga à celulose e à hemicelulose em nível molecular. Essa água absorvida dentro da célula é chamada de água ligada, e se difere da água livre contida no lúmen celular (REICHERT E MENGES, 2014).



Figura 35 - Comportamento do material em diferentes níveis de Umidade Relativa do ar (REICHERT e MENGES, 2008)

Um outro modelo de compreender as possibilidades materiais se faz presente nos estudos de Neri Oxman, a partir dos quais ela cunha o termo “Programar Matéria” através de analogias aos processos, como a natureza lida com a variação racional de densidade, que proporciona a máxima eficiência com o mínimo de recurso possível. Oxman trata o material não como um subordinado da forma, mas sim como o seu definidor (OXMAN, N., 2012). Oxman comenta sobre esse conceito em sua poltrona fabricada com a tecnologia da manufatura aditiva: “A sua superfície, como na natureza, varia a sua funcionalidade não pela adição de um outro material ou outra montagem, mas contínua e delicadamente variando a propriedade do material (OXMAN, N., 2015)”.



Figura 36 - 3D-printed chaise longue by Neri Oxman (OXMAN, 2014)

As tecnologias computacionais trouxeram relações análogas entre a arquitetura e a biologia, de modo que a arquitetura passou a ser comparada às estruturas vivas da natureza. Da mesma forma que os seres vivos no meio ambiente se reconfiguram para continuar evoluindo, a arquitetura evolutiva busca melhor se adaptar ao sistema e ao meio para solução de problemas.

Como uma forma de mediar os avanços da arquitetura, para que estes finalmente se estendam ao usuário do edifício, surge a visão da arquitetura mediada, responsiva, interativa e dinâmica. Essa visão busca o relacionamento do usuário com o contexto físico e cultural e, segundo Oxman (2012) talvez seja a ideia mais desafiadora da arquitetura na atualidade.

A origem desse interesse dinâmico pela arquitetura pode ser exemplificada na obra de Fuller (1929; 1967), Pierre Chareau e Bernard Bijvoet, Price (1960) e Rogers e Piano (1971). Posterior integração dos conceitos de interatividade e responsividade, com tecnologia eletrônica e mecânica foi aplicada por Ito (1986) e Jean Nouvel (1988). Já no século XI, os exemplos continuam a surgir com Diller e Scofidio (2002), Peter Cook e Colin Fournier (2003), e por Beesley (2006) (OXMAN, 2014)

Os primeiros exemplos de arquitetura responsiva e interativa contavam com integração de imagem, luz e som, passando a integrar sistemas de controles computacionais, responsividade ao ambiente, sensores de vento e som, e reconfiguração de superfície (OXMAN, 2014).

Beesley (2006) se pergunta sobre o sentido de responsividade. Propõe que a responsividade implica sensibilidade. E, como o oposto à sensibilidade, implica também estabilidade e isolamento. O estático como oposição ao dinâmico. Beesley procura se opor a essa lógica “fechada” dos sistemas responsivos ao integrar sensores, motores, materiais com memória de forma e organismos vivos que respondam na escala molecular por processos químicos e físicos como nos metabolismos da biologia.



Figura 37 - Hylozoic Ground, Instalação na bienal de Veneza (BEESLEY, 2010)

O design e a cultura digital vêm se tornando cada vez mais um fenômeno revolucionário da arquitetura. Suas conexões interdisciplinares se fazem necessárias na concepção de projetos, influenciando diretamente a produção arquitetônica contemporânea. Novos processos são desenvolvidos a todo instante a fim de acompanhar na mesma velocidade todo o avanço da arquitetura da era digital.

1.5 Conclusões do capítulo

Uma dificuldade da definição teórica da arquitetura digital é a quantidade de termos utilizados e a ausência de uma concordância entre os autores sobre qual o termo que pode representar melhor um conceito. Esse fenômeno é amplificado pela tentativa de usar um título com “efeito”, observado em diversos autores na esfera acadêmica, e por arquitetos na esfera profissional. No artigo de Oxman (2006), esse efeito confuso pode ser visto na escolha que a autora fez no tocante ao termo “Geração” que tanto é usado para o componente genérico aplicado no seu esquema para ilustrar os diferentes processos de projeto, quanto para denominar a classe de projeto “Generativo”. Outra complicação neste mesmo sentido é o uso do termo desempenho empregado como um componente genérico do processo de projeto e também como uma das cinco classes paradigmáticas.

Frazer (2012) diz que a quantidade de parâmetros e os entrelaços de codependência da arquitetura paramétrica fragilizam o processo, engessando o modelo geométrico a um ponto que torna praticamente impossível realizar qualquer alteração.

Continuando a observar as fragilidades de uma arquitetura sem propósitos bem definidos, vemos que o design generativo precisa de cuidados. Uma completa randomização dos parâmetros da forma dificilmente alcança algum resultado de

design satisfatório; é preciso controlar os níveis de randomização e também os seus limites, assim como é igualmente importante a intencionalidade, representada pela solução ótima, previamente estabelecida pelo arquiteto (WEINSTOCK, 2010)

A aplicação da morfogênese digital na arquitetura contemporânea se atém, segundo Oxman (2010), a processos nos quais a forma é “encontrada” e não “proposta”. Desse modo, a forma surge da geração, simulação e otimização dos modelos por meio dos algoritmos. Dentre os conceitos de morfogênese da biologia, os que possuem maior aplicabilidade ao projeto arquitetônico são: o surgimento, a relação da parte com o todo, os sistemas auto-organizáveis, a adaptação evolucionária e a topologia (OXMAN, 2010).

Toda essa gama de processo de projeto e vasta tentativa de interação, dinamismo espacial e singularidade formal não se apresentam como solução que aproxime de fato o usuário do edifício. Cabral (2013) explicita a dificuldade que a arquitetura paramétrica tem de encontrar, no usuário, o diálogo com a forma, tal como acontece com o arquiteto no ato de projetar.

O autor utiliza a ótica da cibernética como um ponto de vista para discutir aspectos do projeto computacional, que passam despercebidos se analisados por outra ótica. O ir e vir de uma infinidade de processos, estilos e conceitos representam para Cabral (2013) uma fragilidade em comum.

Cabral propõe primeiramente distinguir – tal como Reas (*production and conception*), Terzedis (*computerisation and computing*) e Glanville (*illustrating and making*) fizeram – o grau de envolvimento do computador na geração da forma.

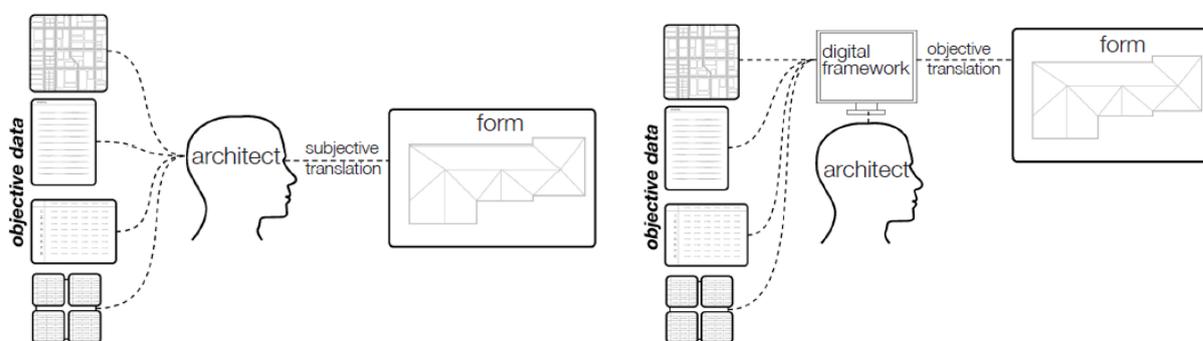


Figura 38 - Form-making vs form finding (SOFLIN, 2012)

Cabral (2013) argumenta que, independente do grau de envolvimento do arquiteto no projeto, mesmo nos processos mais objetivos, há prevalência de uma linguagem estética em comum, que favorece a complexidade formal de uma escala

que desconsidera o usuário, em favor do espetáculo e magnitude de um edifício objetificado.

O uso do algoritmo segundo Cabral (2013) disfarça, com um apelo lógico e matemático, uma intenção e fascínio formal. Esse ponto é similarmente criticado por Frazer (2012) ao dizer que, sem uma intencionalidade lógica, o uso recente do algoritmo não vem deixando claro o que se pretende conseguir.

Frazer afirma que é alta a expectativa colocada sobre os processos de parametrização, segundo ele “por mais que se busque o surgimento de algo inesperado, ainda assim é preciso fornecer alguma intencionalidade, do contrário corre-se o risco de que “o nada surja do nada” (FRAZER, 2012).

Cabral (2013) sugere que as respostas dos projetistas devem passar a pensar na arquitetura como um sistema que envolva o habitante, ao contrário de pensa-lo apenas como um dado em um novo processo de projeto baseado em regras.

Uma vez transpassado o paradigma de um projeto paramétrico, faz-se necessário que os parâmetros não fiquem congelados após o edifício ser executado. E que o edifício transpire aspectos da vida, não apenas através de metáforas formais e espaciais (CABRAL, 2013). Para isso, Cabral propõe que a arquitetura seja análoga à cibernética de segunda ordem: o relacionamento arquitetônico deve acontecer não entre o edifício e seus componentes, mas sim entre o edifício e seus ocupantes.

Este capítulo buscou reunir todos os conceitos encontrados na primeira e segunda era da arquitetura digital, em um ambiente onde os conceitos se repetem e se misturam, sendo importante organizá-los. O arquiteto, necessitando de conhecimento em vários campos, precisa de uma estrutura clara que o guie nos campos pelos quais ainda não transitou, portanto, o fluxo de informação e os componentes disponíveis devem ser mapeados. Os conceitos se relacionam em uma nuvem, onde a atração entre um conceito e outro depende do potencial do arquiteto em guiar seu próprio processo de projeto.

A sistematização de Oxman é muito útil nesse sentido, ao estabelecer componentes genéricos do processo de projeto, que podem se relacionar de diversas maneiras, de tal forma que a integração sucessiva conecte as soluções. O projeto não é o único a ser evolutivo; o processo de projeto também deve ser, também deve evoluir, deve integrar, deve adicionar, deve focar no estrutural, no material, no espacial, no elemento (parte), no edifício (todo), deve focar no cinético, ou no vivo, deve ser aberto.

Com essa sistematização será possível enfim realizar um diálogo com a materialidade da manufatura aditiva no próximo capítulo. A análise da impressão 3D pode vir a de alguma maneira contribuir para uma maior interação e vida no edifício.

Capítulo 02: O contexto inicial e o panorama da impressão 3D na arquitetura

O uso da impressão 3D na arquitetura vem de um recente histórico do uso da fabricação digital pela arquitetura e construção em projetos de vanguarda tecnológica na última década do século XX. Inicialmente contextualizando o surgimento e o reconhecimento da manufatura aditiva, em um campo dominado por métodos subtrativos e formativos, o capítulo 02 segue com esclarecimentos dos conceitos básicos e um breve catálogo dos principais métodos de impressão 3D, dando destaque aos tipos de tecnologia desenvolvidos ou aplicados especificamente para a arquitetura na escala real do edifício.

O segundo capítulo apresenta o panorama da impressão 3D com uma abordagem globalizada do uso da tecnologia, mostrando o que tem sido explorado em campos correlatos. Com isso é levantado o cenário global da manufatura aditiva nos diversos setores e as suas implicações sociais, observando relações entre os campos correlatos à arquitetura. O capítulo 02 finaliza com uma recente retrospectiva – sob a forma de uma linha do tempo - focando na utilização da tecnologia por arquitetos e pela construção civil.

A linha tempo busca o panorama do recente uso da impressão 3D na arquitetura, em propostas da esfera profissional e acadêmica. Procura reunir, analisar e discutir as informações publicadas sobre o tema até o momento, identificando possíveis intenções do projetista em modificar a relação de interação do usuário com o edifício projetado. Coletam-se informações utilizando revisão da literatura de fabricação digital e robótica na arquitetura, em relatórios de empresas que adotaram o método da manufatura aditiva, pesquisas em instituições acadêmicas, em blogs de arquitetura e blogs de impressão 3D, palestras, empresas de serviços de impressão 3D e empresas de serviços de fabricação digital, da impressão 3D na arquitetura.

2.1 Da industrialização à fabricação digital na arquitetura

Buswell (2006) aponta que os princípios fundamentais da construção não mudam há centenas de anos. Os romanos inventaram o concreto cerca de 100 aC e, 2200 anos depois, ainda o estamos usando como material básico de construção e sua aplicação ainda acontece com a mão humana.

“A história humana é muitas vezes influenciada pela introdução e uso de novos materiais e tecnologias (...) as civilizações humanas são

muitas vezes divididas em idades de acordo com os materiais que dominam a sociedade. Por exemplo, a idade da pedra, a idade do bronze e a idade do ferro (...), mas com o crescimento econômico e o progresso da ciência dos materiais no século 21, a evolução e a aplicação de novos materiais têm sido aceleradas, resultando em uma grande quantidade de novos materiais, mas apenas algumas pessoas que sabem como trabalhar com eles.” (ARROYO et al, 2007)

A introdução de robôs na construção não se deu de imediato. Faz parte de uma longa história de industrialização e automação no local de construção. A revolução industrial e o desenvolvimento de uma infraestrutura de transporte, na Europa do século 18 e 19, deram os primeiros passos para a mudança de um processo construtivo inicialmente dependente das disponibilidades locais de material e habilidade construtiva, para um cenário mais mecanizado e serial, independente da tradição construtiva local. Nas décadas de 1920 e 1930, uns poucos protótipos de edifícios anteciparam o que na segunda metade do século 20 se tornou a chamada “construção industrializada”, que atingiu a larga escala com elementos pré-fabricados em série e produção em massa de casas padronizadas. O surgimento de maquinário específico para construção e a automação de construção para edifícios verticais foram desenvolvidos principalmente no Japão e em outros países asiáticos durante os anos 1990, devido à necessidade imediata de reconstrução de cidades destruídas por terremotos (BOCK; LANGENBERG, 2014).

No setor de manufatura, a automação usando robôs industriais e máquinas que usam controle numérico iniciou na década de 1960. O desenvolvimento de microprocessadores na década de 1970 e a revolução do computador na década de 1980 trouxeram os softwares de desenho auxiliado por computador, fornecendo ao arquiteto o poder de manipular geometria. Os desenvolvimentos em CAD e CAM também forneceram um processo de rápida produção industrial. Na década de 1990, a modelagem paramétrica avançada foi introduzida, e a indústria de arquitetura tem desenvolvido a partir daí uma integração maior entre ferramentas de projeto e de controle de máquinas (BUSWELL et AL, 2006).

Gramazio e Kohler (2013) dizem que, diante de toda especulação surgida a partir da digitalização da arquitetura (arquitetura na era digital, arquitetura virtual), o robô em si é o elemento que traz a base da compreensão digital que, desde o início da industrialização do edifício, foi mais sonhada do que realizada. O robô, segundo os

autores, provoca as mudanças fundamentais na disciplina, funcionando como uma conexão recíproca da realidade digital com a realidade física da arquitetura.

Diferentes dos primeiros experimentos da arquitetura digital, que buscavam formas inovadoras na virtualidade, os novos experimentos buscam o enriquecimento físico da disciplina. A materialização do digital é o novo foco (GRAMAZIO; KOHLER 2013).

Um dos primeiros exemplos e um dos desenvolvimentos mais impressionantes da introdução da Fabricação Digital com a aplicação de técnicas CAD/CAM em grande escala para a criação de componentes estruturais e fachadas, foi a Vila Olímpica em Barcelona, construída entre 1989 e 1992. Foi desenhada por Frank Gehry e construída pela empresa Permasteelisa. Projetado no CATIA, uma ferramenta de modelagem de sólidos projetada para a indústria aeroespacial, os dados do modelo digital foram utilizados na fabricação da estrutura. Essa combinação produziu muitos outros projetos, como o Museu Guggenheim de Bilbao, Espanha em 1997, e o Walt Disney Concert Hall em Los Angeles em 2003 (BUSWELL et AL, 2006).

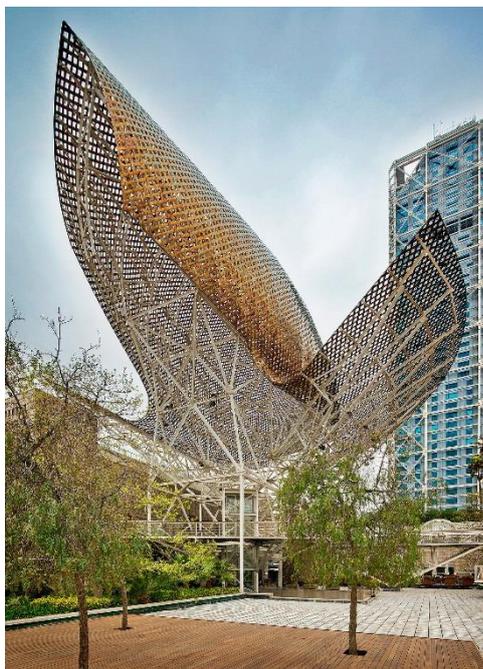


Figura 39 - Vila Olímpica em Barcelona (GEHRY, 1989)

As aplicações comuns de fabricação por CNC na construção são processos de corte usados para formar elementos de aço estrutural e processos de fresagem empregados para criar grandes moldes de poliestireno para moldagem de concreto ou vidro (BEORKREM, 2013).

O computador teve seu impacto no design. O pavilhão para o automóvel de 1999 da BMW foi desenhado por Bernhard Franken. A forma da estrutura foi definida por uma simulação computacional de duas gotas de água fundindo (BEORKREM, 2013).



Figura 40 - Pavilhão do automóvel BMW (FRANKEN, 1999)

A ponderação de Beorkrem (2013) é uma análise simplista do processo de utilização de simulação computacional para obtenção da forma. Indo mais a fundo, percebemos aqui uma fenda passível de maior aprofundamento. No caso do pavilhão projetado por Franken, o software de simulação é um programa de animação cinematográfica. Foi a indústria do cinema que primeiramente necessitou de diversos tipos de simulações, com propósito de produzir digitalmente os chamados “efeitos especiais”. O arquiteto digital da primeira era utilizou softwares de outras indústrias, e ainda hoje as simulações e processos de projeto vinculados a métodos de surgimento da forma, ou form-finding, majoritariamente os utilizam.

Foi a indústria da animação que implantou e desenvolveu simulações de fluidos, simulações de contato, simulação de partículas, etc. Lynn foi o primeiro arquiteto a empregar esses princípios, como exposto em seu livro *Animated architecture*. As propostas de Lynn são posteriormente substituídas pela arquitetura paramétrica, onde a prerrogativa de constituição da forma é pela definição dos parâmetros, não do formato.

O Elo conceitual a propiciar a adoção desses softwares e métodos de fabricação dentro do campo dos movimentos arquitetônicos foi processo de Folding, (ou dobra) destacado por Lynn, como a transição entre o desconstrutivismo e sua lógica de oposição e conflito entre volumes, para uma estratégia arquitetônica baseada na conectividade e fluidez entre os volumes (LYNN, 1999).

No folding, o projeto parte da geometria euclidiana representada por volumes simples distribuídos em um espaço cartesiano e aplica uma topologia flexível de lógica “emborrachada”, uma topologia elástica, esticável por assim dizer. A

geometria dessa nova superfície topológica é definida matematicamente no espaço tridimensional como NURBS (Non-Uniform-Rational B-Splines - curvas uniformes, não racionais básicas) (KOLAREVIC, 2001).

O que levou ao uso das curvas geradas por NURBS foi o apelo pela habilidade de facilmente controlar os formatos das superfícies, manipulando uma pequena quantidade de pontos de controle, pesos e nós. E a possibilidade de que suas formas possuem coerência necessária para construção com máquinas CNC (KOLAREVIC, 2001).

No início, NURBS foram apenas utilizadas em pacotes de CAD para empresas automotivas. Mais tarde elas tornaram-se parte de pacotes de programas gráficos (ROGERS, 1991). Ou seja, surgida na indústria automotiva, passou a ser usada por programas gráficos voltados para animação e então usada por arquitetos dentro de programas gráficos de animação ou em programas CAD automotivos.

As NURBS, com resposta do resultado em tempo real, só foram manipuladas em *workstations* a partir 1989. Em 1993, a interpretação interativa (projetista vs computador) das curvas e superfícies NURBS em PC's (computadores pessoais) foi desenvolvida por CAS Berlim, uma pequena empresa, cooperando com a Universidade Técnica de Berlim, em uma plataforma NörBS (ROGERS, 1991).

Na arquitetura paramétrica, ao serem atribuídos diferentes valores para cada parâmetro, diferentes objetos ou configurações entre objetos são obtidos. A relação entre os objetos ou volumes pode ser definida não apenas pela atribuição de valores fixos, mas também por equações que associem a relação entre os volumes ou objetos. Essa arquitetura de associações geométricas é definida por Burry (2003) como uma constituição geométrica mutualmente vinculada.

Na Arquitetura Evolucionária, segundo Frazer (1995) o surgimento da forma se dá a partir de regras generativas capazes de evoluir gradativamente o projeto arquitetônico até o encontro da performance desejada com a forma encontrada. O uso do método de Arquitetura Evolucionária é vinculado ao uso de uma técnica de “busca aleatória guiada”, conhecida pela ciência da computação como “Algoritmos Evolucionários” (Niraula, 2010).

Esses processos estão vinculados em maior ou menor intensidade à geração da forma, encontro da forma ou emergência da forma. O grau de intensidade com o qual a forma é proveniente de um procedimento Determinístico ou

Indeterminístico é medido pela proporção na qual a tomada de decisões é realizada pelo projetista ou pelo computador, neste último caso através do sistema generativo.

Kolarevic (2005) menciona que todas essas propostas de geração de forma estão unidas pelo uso da geometria topológica. O espaço topológico é o elo entre os diferentes sistemas generativos, abrindo caminho para um campo onde as formas assumem possibilidades de variação em processos dinâmicos, não lineares e indeterminísticos que oferecem a capacidade generativa ao campo da arquitetura.

Enquanto Schumacher (2017) argumenta que os parâmetros da arquitetura paramétrica respondem às variações e complexidades da condição da sociedade contemporânea, Spiller (2010) aponta que é comum encontrar na arquitetura paramétrica uma ênfase no processo e no uso da tecnologia que empobrece o produto final.

Nesse sentido, John Frazer (2011) reflete sobre a necessidade da **intencionalidade** dentro do uso de sistemas generativos. Argumenta ser necessário entender o que está sendo solucionado com o processo, que problemas estão sendo resolvidos. A arquitetura generativa deve elucidar uma solução para um problema conhecido, do contrário pode ocorrer o surgimento de uma forma totalmente aleatória que não responde especificamente a nada. Frazer sintetiza o papel da Intencionalidade como fundamental na arquitetura generativa, dizendo que, ainda que o resultado da codificação seja inesperado, a intenção deve ser explícita.

A intencionalidade, como recomendada por Frazer, baseia-se na fundamentação de que o projeto arquitetônico deve atender à tríade básica da arquitetura proposta por Alberti: beleza, firmeza e utilidade. Sem a intencionalidade, a arquitetura generativa empobrece o resultado final. Perde a utilidade e busca simplesmente a beleza, sendo essa falha explicada por Spiller (2010) como proveniente de um encantamento pela forma inesperada.

A concepção da arquitetura digital deve ser inserida, portanto em um contexto mais amplo, dotado de utilidade, capaz então de responder aos diversos condicionantes de projeto da contemporaneidade. O projeto arquitetônico é entendido por Andrade (2011) como uma síntese dos limites ou possibilidades, oferecidos ou impostos por diversos condicionantes, sendo os principais os tecnológicos, os normativos, estéticos, funcionais, ambientais, financeiros e clientelistas.

O conjunto dos condicionantes exemplificados por Andrade (2011) pode ser constatado na prática profissional do escritório do arquiteto Frank Gehry: o

condicionante tecnológico compreende o uso de programas computacionais da indústria automobilística aliados a meios de fabricação digital; os documentos normativos bidimensionais para aprovação do projeto pelos órgãos responsáveis foram gerados por software BIM; os estéticos e funcionais ficam sob responsabilidade de Frank Gehry e são implementados através de maquetes físicas e esboços do arquiteto; os ambientais são resolvidos com informações colhidas em simulações digitais; e os financeiros são definidos pelos clientes e pensados durante a concepção junto com o software que prevê o custo de fabricação, baseado na complexidade das geometrias e em dados obtidos dos fabricantes com base no material escolhido (LINDSEY, 2001).

O cenário da implementação da fabricação digital na mudança do século é marcado pela descoberta de como materializar o edifício concebido digitalmente. Dispensando a necessidade de representação tradicional – que se mostrou impeditiva e impraticável – os modelos BIM envolvem os condicionantes dentro de um mesmo processo.

A conexão direta entre os dados digitais de projeto e os procedimentos de construção física leva, segundo Gramazio e Kohler (2013), a novos processos de projeto baseados em estratégias de fabricação: “O termo “fabricação digital” significa uma combinação perfeita de planejamento digital com o processo de fabricação física. Os dados do projeto são enviados para uma máquina, por exemplo um robô, e diretamente implementados na realidade”.

Do modelo digital, ainda que o projeto contemple toda a informação pertinente a sua construção, a sua fabricação ainda depende da decomposição do modelo único 3D, para implementação de diferentes técnicas de fabricação com lógica 2D. As técnicas de fabricação inicialmente difundidas na arquitetura consistem no uso de equipamentos de fabricação subtrativa e formativa. Para cada técnica de fabricação foram consolidadas distintas estratégias de fabricação, tanto para elementos estruturais quanto para elementos de revestimento.

Kolarevic (2005) destaca, dentre os meios digitais de preparação para fabricação 2D, a produção por cortes sequenciais, triangulação e desenvolvimento. Todos envolvendo a extração de componentes planos com informações bidimensionais a partir de complexos modelos tridimensionais de superfícies ou sólidos geometricamente complexos que compõem o edifício. Qual dessas estratégias

é usada depende do que está sendo definido tectonicamente: se é a estrutura, o envelope (revestimento), ou uma combinação dos dois.



Figura 41 - Estratégia de fabricação por cortes sequenciais a) Metropol Parasol Sevilha, Espanha, (MAYER-HERMANN, 2011) B) Interior por Mark Goulthorpe (GRASSL, 2011)



Figura 42 - Estratégia de fabricação por triangulação (FUKSAS, 2004)

Nos primeiros exemplos de fabricação digital, os processos de fabricação ficam evidentes nos edifícios construídos. Em certo ponto os aspectos visuais decorrentes da escolha da estratégia de materialização passaram a ser explorado como qualidade estética, tornando-se também símbolos de uma nova tectônica, e sinônimo de inovação. A nova linguagem da arquitetura passou a incorporar elementos facetados ou opô-los em superfícies fluidas.



Figura 43 - Contraste entre a linguagem fluida e facetada a) Heydar Aliyev Center em Baku, Azerbaijão, por Zaha Hadid Architects, (BAAN, 2013) b) Estação de trem de Logroño, Espanha, por Ábalos + Sentkiewicz arquitectos, (HEVIA, 2009)

Oxman (2010) defende que o conteúdo tectônico na arquitetura digital pode ter três pontos de partida nos procedimentos de encontro da forma, podendo o arquiteto optar por definir primeiramente a estrutura do edifício (como fizeram Antoni Gaudí e Frei Otto), definir primeiramente o material do edifício e só posteriormente os princípios estruturais, ou definir primeiramente a forma e só posteriormente o material e princípio estrutural.

O processo de materialização bem definido leva em consideração a escolha do material. Beorkrem (2013) aborda sobre como a performance específica do material direciona o processo de fabricação digital e determina a técnica adequada a ser usada. As características mais importantes - do uso de cada material - são identificadas como: os tipos de conexões, custo, deformação, cor, textura, acabamentos, dimensões, durabilidade, resistência a intempéries e impermeabilização. Os materiais são divididos por Beorkrem em cinco classes: madeira, metal, concreto, híbridos e reciclados.

Como o nome indica, a fabricação subtrativa envolve a remoção de um determinado volume a partir de um bloco sólido, usando instrumentos de fresa ou corte de vários eixos. O controle sobre o movimento do equipamento que remove o material é realizado com comandos numéricos coordenados por um sistema informatizado CNC. A fabricação subtrativa foi aplicada na construção para produzir moldes tridimensionais em isopor para a moldagem de elementos de concreto ou para a produção de painéis de vidro laminado com geometria de curvatura dupla, tanto fora do local como no local da construção. Os processos subtrativos bidimensionais como o corte a laser ou fresa de elementos planos como chapas metálicas ou madeira foram

difundidos como métodos de fabricação de elementos de revestimento de fachada (Kolarevic, 2005).

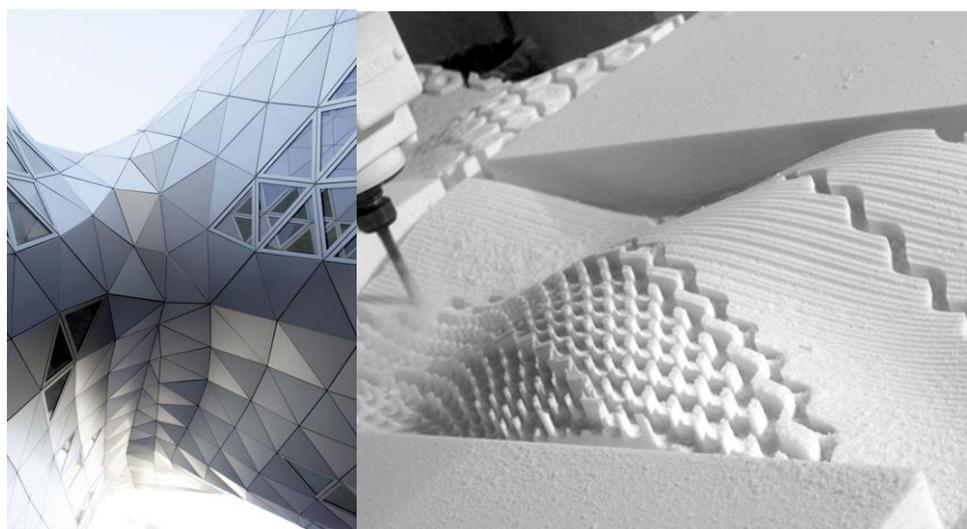


Figura 44 - a) Hotelfachschule, Montpellier (FUKSAS, 2012) b) fabricação subtrativa 3D (KYCIA, 2017)

Na fabricação formativa, o material é remodelado ou deformado. O processo pode acontecer por aplicação de forças mecânicas, calor ou vapor. A forma desejada pode ser obtida com ou sem o auxílio de moldes. Por exemplo, o material remodelado pode ser deformado permanentemente por procedimentos como forçar o metal após o seu limite elástico, a partir do aquecimento do metal, em seguida, dobrando-o enquanto ele está em um estado amolecido. As possibilidades mais difundidas de métodos formativos na arquitetura estão na dobra de chapas planas e dobra de tubos metálicos com funções estruturais (Kolarevic, 2005).



Figura 45 - Dobra de tubos metálicos a) Heydar Aliyev Center (ZHA, 2012) b) Leith Street Bridge, Edinburgh (BUROHAPPOLD, 2003)

Menges (2015) defende que novos meios de fabricação e tecnologias construtivas sempre foram catalisadores de inovação no projeto. Os equipamentos de fabricação digital, usados no campo da arquitetura e construção, foram apropriados de outras indústrias como a naval, automobilística e aeronáutica, que os utilizaram

pioneiramente. A adoção dessas máquinas, controladas por computador, inicialmente tinham a função de produzir elementos pré-fabricados em série, a capacidade de personalização das peças não era o foco inicial.

A evolução dos equipamentos possibilitou maior velocidade e precisão, mas pouco foi explorado até que a capacidade de geração de formas mais personalizadas e com geometrias mais complexas fosse possível a partir dos avanços nos processos de projeto, também implementados a partir da experiência de outras indústrias.

O preenchimento de algumas lacunas, encontradas no uso de ferramentas de fabricação digital, vem acontecendo com a consolidação de tecnologias de métodos de Manufatura Aditiva.

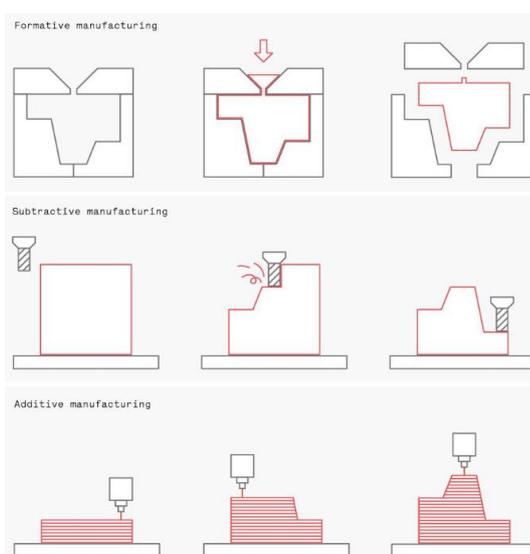


Figura 46 - Comparativo esquemático entre fabricação formativa (alto), subtrativa (centro), e aditiva (abaixo) (3D HUBS, 2017)

Complementando o catálogo de possibilidades de fabricação digital atual, a manufatura aditiva conta com um tipo de tectônica e materialidade específico, que abre possibilidades formais que até então não fazia parte do repertório da fabricação digital que contava com tecnologia de métodos de manufatura subtrativa e formativa, abrindo portas para novos procedimentos, lógicas e estratégias de fabricação assim como possibilitando novas combinações em métodos de fabricação híbridos.

2.2 Histórico da impressão 3D

Os fundamentos da tecnologia de impressão 3D podem ser atribuídos a práticas de topografia e foto-escultura. Dentro da topografia, Blanther, em 1892, sugeriu o uso de camadas para confeccionar um molde de mapa em relevo. O

processo foi o primeiro que envolveu cortar as linhas de contorno em uma série de placas posteriormente empilhadas. Foto-escultura foi uma técnica do século 19 para criar réplicas tridimensionais exatas de objetos. O mais famoso uso de foto-escultura foi de Francois Willeme. Em 1860, colocou 24 câmeras em uma matriz circular e simultaneamente fotografou um objeto. A silhueta de cada fotografia foi usada para esculpir uma réplica (BEAMAN, 1997).

A estereolitografia, o primeiro método de impressão 3D, e o seu inventor Chuck Hull, tido como criador da impressão 3D nos anos 80, continuam sendo importantes para a tecnologia atualmente. A estereolitografia é hoje o mais rápido e um dos mais precisos métodos de impressão, e Chuck Hull é o dono de uma das maiores empresas de impressoras desktop.

Outros inventores desenvolveram ideias semelhantes, mas foi a de Hull que foi desenvolvida até a tecnologia chegar ao mercado de verdade. As primeiras tentativas remontam a 1971, quando Wyn Kelly Swainson registrou uma patente que descreveu a criação de objetos 3D com o uso de fotopolímeros⁹. No entanto, seu trabalho foi interrompido na década de 1980, com seu método mostrando-se impraticável.

Mais tarde, na década de 1970, o Dr. Hideo Kodama fez uma nova tentativa. Ele foi o primeiro a propor o objeto elaborado camada por camada, como se reconhece na estereolitografia e na grande parte dos métodos de manufatura aditiva.

O salto de inovação aconteceu quando um grupo de engenheiros franceses formado por Alan Le Mehaute, Jean Claude Olivier e André De Witte preencheu um novo pedido de patente. Por uma diferença de poucos dias, o norte-americano Chuck Hull preencheu um pedido de patente semelhante. O pedido da equipe francesa foi abandonado pela empresa em que trabalhavam, alegando falta de perspectiva de negócios. Então, finalmente, Chuck Hull pôde comercializar com sucesso a tecnologia, criando a palavra "estereolitografia" ao longo do caminho.

Os desenhos e conceitos propostos nas primeiras patentes solicitadas e na patente final concedida a Chuck Hull apresentam muitas similaridades. O reconhecimento de Hull se deve conjuntamente pelo desenvolvimento da patente, pelo desenvolvimento do formato de arquivo digital STL que é o formato padrão para quase todos os equipamentos e pela criação da empresa 3D Systems.

⁹ Polímeros que reagem à luz, solidificando-se, são a base da estereolitografia.

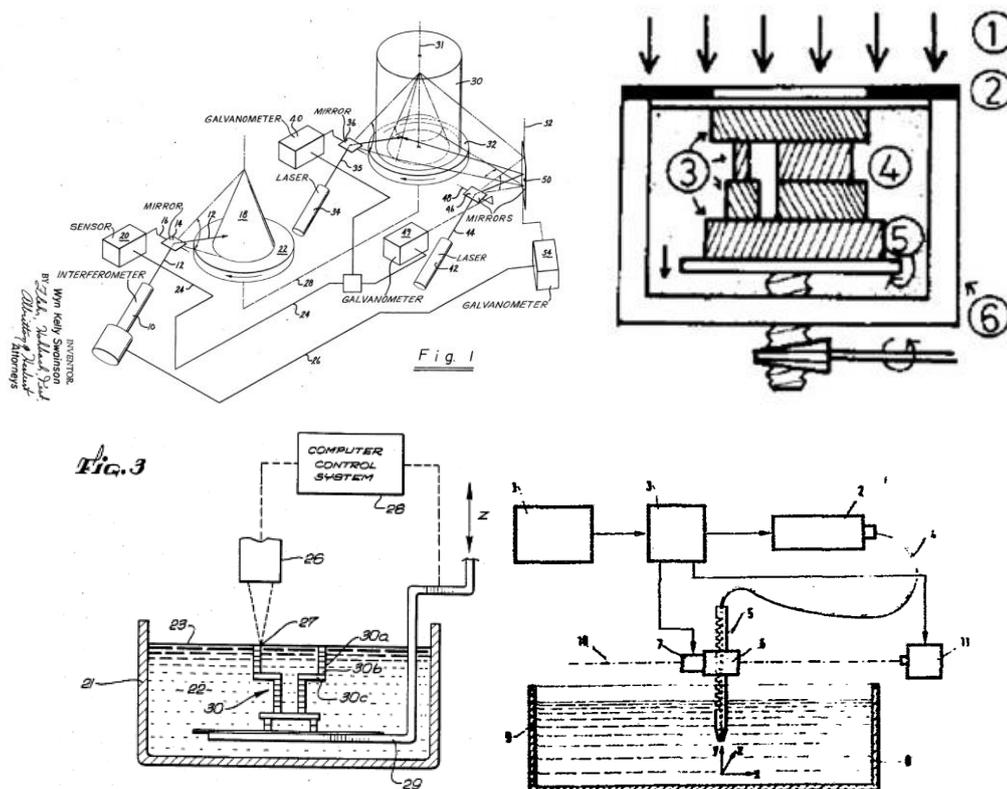


Figura 47 - Semelhança entre as primeiras propostas de patentes de estereolitografia (Hull, Mehaute, Swainson e Kodama) (SILVA, 2017)

As técnicas de manufatura aditiva foram utilizadas pela primeira vez no final dos anos 80 no Japão e nos Estados Unidos. Sua função primária, durante a primeira década após o desenvolvimento, era produzir rapidamente protótipos de objetos, daí se dando o uso do primeiro nome atribuído à tecnologia, “Prototipagem Rápida” (GARDINER, 2011).

Nesse período, a indústria automotiva caminhava do modelo de Fordismo para o do Toyotismo, refletindo a mudança de foco do modelo de Ford que utilizou os princípios de padronização e simplificação, passando a implementar o modelo de Taiichi Ohno com aplicação dos princípios de flexibilização da produção e do chamado *Just in Time*, que adquiriram projeção global (OHNO, 1988).

No Toyotismo, somente se produzia o necessário, reduzindo ao máximo os estoques. Essa flexibilização tinha como objetivo a produção de um bem exatamente no momento em que ele fosse demandado, no chamado *Just in Time*. Dessa forma, ao trabalhar com pequenos lotes, visando a qualidade dos produtos ser a máxima possível, o Toyotismo assume, portanto, outra relação, com a lógica da customização em massa da manufatura aditiva.

"In 1988, 3D Systems and CMET, a Japanese company, sold a total of 34 Stereolithography systems. These machines were among the first in a new class of technology that produced physical objects by joining thin layers of material, one on top of the next. The shipment and use of these machines marked the beginning of a new industry."¹⁰ (WOHLERS, 2007)

Essas máquinas eram no início, como a maioria dos novos produtos, muito caras, com custo de \$ 75.000 a \$ 750.000 (AUBIN, 1994). Hoje é possível comprar uma máquina desktop montada com kits *open source* por US \$ 400. Essa mudança de custo indica a maturidade crescente da indústria, com máquinas que antes eram acessíveis apenas dentro das grandes corporações, enquanto hoje estão disponíveis em escolas, *fablabs* e universidades em todo o mundo.

À medida que a qualidade dos produtos provenientes das máquinas de Prototipagem Rápida aumentou, começou-se a usar essas máquinas para produtos de uso final, daí a adaptação do termo de "Prototipagem Rápida" para "Fabricação Rápida". Entidades como a NASA e a Boeing começaram a usar dispositivos de Fabricação Rápida na década de 1990, para ordens de peças únicas ou de pequenas tiragens (HOPKINSON; DICKENS, 2001).

Os benefícios adicionais decorrentes do uso das máquinas para produção de produtos finais desencadeiam novos valores significativos para a fabricação. Esses ganhos podem ser vistos com produtos de baixa tiragem, geometrias altamente complexas e customização das propriedades dos materiais (WOOTEN, 2006).

As técnicas de impressão 3D, especificamente para a construção de edifícios, tiveram desenvolvimento inicial na segunda metade da década de 1990, com dois métodos distintos sendo publicados. Um deles teve o desenvolvimento do método interrompido, baseando-se na deposição de areia e cimento com cura seletiva, utilizando vapor (PEGNA, 1995). O segundo, o método "*Contour Crafting*" que hoje tem certo espaço comercial em algumas empresas, utiliza deposição de concreto por um bico instalado em pórtico móvel (KHOSHNEVIS, 1996).

Desde a virada do século, foram inventados procedimentos adicionais, incluindo uma técnica de deposição de concreto baseada em guias (WILLIAMS et al., 2004), e uma série de variações e implementações do método *Contour Crafting*

¹⁰ Em 1988, a americana 3D Systems e a japonesa CMET, venderam um total de 34 equipamentos de estereolitografia. Estas máquinas estavam entre as primeiras de uma nova tecnologia que produzia objetos físicos juntando finas camadas de material, uma em cima da próxima. A entrega e uso destas máquinas marcaram o início de uma nova indústria (tradução nossa)

propostas por Koshnevis. No entanto, o método desenvolvido por Enrico Dini na empresa D-Shape, com base em um sistema de solidificação de cama de areia seletivamente ativada, é a tecnologia de maior destaque na construção de edifícios dentre as desenvolvidas nesse período (DINI et al., 2008).

Durante o curso do desenvolvimento de vários métodos e aplicações, foi utilizada uma infinidade de termos dentro do vasto campo da manufatura aditiva, entre eles: Prototipagem Rápida, Fabricação por camadas, Manufatura rápida, fabricação de forma livre¹¹. Todos esses termos hoje são englobados pelo termo Manufatura Aditiva¹².

O termo 3D Printing foi usado pela primeira vez em uma patente desenvolvida pelo MIT em 1993. Referiu-se originalmente a um processo de cama em pó que empregava cabeças de impressão a jato de tinta padrão e personalizadas (SACHS et al, 1993). A impressora proposta na patente foi desenvolvida e comercializada pela Z Corporation que, em 2006, foi comprada pela 3D Systems.

2.2.1 Tipos de Tecnologia de Impressão 3D

Os métodos de manufatura aditiva são caracterizados pela adição de camadas de material para produzir peças sem a necessidade de ferramentas especiais ou moldes. Para todos os tipos de processos, o dado do modelo digital 3D é a base para o processo de fabricação. O objeto é desenvolvido no computador. Para a fabricação, os dados são então convertidos em uma linguagem de computador que coordena o equipamento de manufatura aditiva.

O princípio da fabricação aditiva é o mesmo para todos os diferentes métodos. O software de computador específico divide o modelo 3D CAD¹³ em camadas. Essas camadas orientadas no sentido horizontal definem o caminho percorrido pelo equipamento CAM¹⁴ para construção do objeto. O processo de divisão do objeto em camadas é chamado de fatiamento¹⁵.

O dispositivo de saída do objeto, chamado de "impressora 3D", processa cada camada do modelo consecutivamente. O contorno e o interior da peça são solidificados a cada camada. Dependendo do método, a solidificação é feita de

¹¹ Rapid Prototyping, Layered Fabrication, Rapid Manufacturing, Freeform Fabrication

¹² Additive Manufacturing

¹³ Computer-Aided Design

¹⁴ Computer-Aided Manufacturing

¹⁵ *Slicing* refere-se ao procedimento de fatiamento; *Slicer* refere-se ao software que executa esse procedimento.

diferentes formas: por exposição à luz UV, aquecimento seguido de resfriamento, solidificação por reação química, sinterização a laser, entre outras. Diferentes estratégias técnicas são também necessárias a cada método de impressão para unir a nova camada com a anterior. Esse procedimento em geral acontece em uma plataforma de impressão¹⁶, dentro do equipamento que normalmente limita as dimensões do objeto (STRAUß, 2013).

Assim, camada por camada, o objeto representado virtualmente no modelo CAD é trazido para a sua realidade física. Um único modelo pode consistir de centenas a milhares de camadas, dependendo do seu tamanho e resolução. A espessura da camada é diferente para cada método e cada sistema de manufatura aditiva utilizado, variando de décimos de milímetro até alguns microns. No caso da impressão com concreto, as camadas em geral possuem entre 1 e 3 centímetros.

Uma vez que o modelo foi totalmente materializado, o objeto pode ser removido da máquina. O processo pode levar de algumas horas a vários dias. Dependendo da tecnologia aplicada, o processo de impressão é seguido por vários processos subsequentes (pós-processamentos), tais como remoção de suportes, limpeza superficial, remoção de material não curado, impermeabilização e outros.

O produto acabado é um produto físico, tridimensional, realizado a partir dos dados do modelo virtual.

A impressão 3D possui diferentes tecnologias. A manufatura aditiva é um conceito mais amplo, na qual se encaixam os diferentes tipos de impressora 3D. A camada é o conceito mais comum entre os diferentes métodos de impressão 3D, no entanto há hoje novos conceitos e reformulações de métodos que se diferenciam da ideia de que a impressão 3D é a construção ou produção de um objeto camada por camada, como algumas propostas com braços mecânicos como as utilizadas por Joris Laarman no IAAC¹⁷, e no projeto junto a MX3D e a Autodesk que pretende construir uma pequena ponte. Essas propostas são especialmente importantes para a arquitetura, na medida em que proporcionam o uso do aço na escala arquitetônica, em um procedimento *in-loco*, ao mesmo tempo em que, com o movimento do braço robótico, é possível controlar a direção do material impresso, dominando as propriedades mecânicas de anisotropia e ortotropia.

¹⁶ Printing bed

¹⁷ Institute for Advanced Architecture of Catalonia

Os braços robóticos alcançam maior liberdade de movimento, podendo ter até sete eixos de rotação, suprimindo os 3 eixos comuns às impressoras 3D, que limitam o posicionamento das camadas de forma paralela, horizontal.

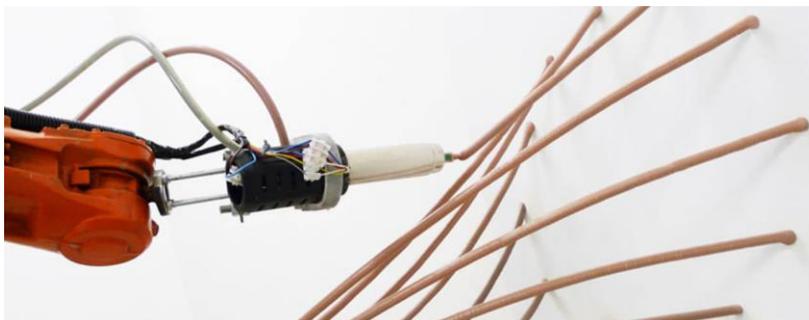


Figura 48 - Braços mecânicos utilizados por Joris Laarman no IAAC (LARRMAN, 2013)

Esse método é o resultado de uma pesquisa iniciada pelo Joris Laarman Lab, em colaboração com o Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC).

Ao usar uma tecnologia de extrusão inovadora e resina de cura super-rápida, conseguiram neutralizar o efeito da gravidade durante o processo de impressão. Este método possibilita a criação de objetos 3D em qualquer superfície de trabalho, independentemente da inclinação e suavidade, e sem necessidade de estruturas de suporte adicionais. Sendo possível neutralizar o efeito da gravidade durante o processo de impressão. Este método dá flexibilidade para criar objetos de forma orgânica ao fazer curvas 3D ao invés de camadas 2D. Ao contrário das camadas 2D que ignoram a estrutura do objeto, as curvas 3D podem seguir linhas de esforço mecânico exatas e de uma forma personalizada. O novo método de impressão fora da caixa pode ajudar a fabricar estruturas de quase qualquer tamanho e forma (LAARMAN et al., 2013).

Há a comum prática de abordar a impressora 3D, metodologicamente como uma máquina universal capaz de produzir objetos de formatos infinitos, com materiais infinitos. Isso é verdade talvez para a manufatura aditiva, em seu conceito teórico mais amplo, porém cada tipo de impressora 3D possui hoje uma limitação diferente, que as afasta dessa definição universal. Os termos “impressão 3D” e “Manufatura Aditiva” ainda são muitas vezes sinônimos no uso casual, mas alguns especialistas da indústria de fabricação vêm fazendo uma distinção no sentido de que a Manufatura Aditiva compreende a Impressão 3D e outras tecnologias ou outros aspectos de um processo de fabricação.

Na impressão 3D, hoje, cada máquina possui um modo distinto de operação. Esses modos podem ser classificados em categorias de acordo com seus

métodos. Cada procedimento possui uma variedade material disponível diferente, bem como resoluções diferentes, velocidades diferentes, permitindo tamanhos diferentes e alcançando propriedades materiais diferentes.

De modo universal, em todos os métodos de fabricação por camadas, a espessura da camada transversal de um objeto construído depende da limitação de cada tecnologia (KWON, 2002). Por exemplo, a precisão da luz UV que seletivamente proporciona a cura da resina líquida de fotopolímero (método SLA), a espessura do bico que aquece o filamento plástico e a capacidade de controle dos mecanismos que movimentam o bico (método FDM), a precisão com que a cama de pó é depositada (método SLS & SLM) estão entre os limitantes de cada uma dessas tecnologias no que tange à resolução de impressão.

A resolução das camadas transversais possui implicações diretas na velocidade de fabricação e na qualidade da superfície do objeto desejado. O tempo de construção de uma peça é diretamente proporcional ao seu número de camadas. A velocidade também está diretamente relacionada com o tamanho do objeto a ser fabricado (KWON, 2002).

A espessura da camada tem efeito direto sobre a qualidade da superfície do objeto criado. De modo geral, a melhor qualidade é alcançada com camadas mais finas. Uma dificuldade comum é a fabricação de superfícies verticalmente curvas. Para uma superfície verticalmente curvada, a espessura da camada deve ser menor, para evitar que o acabamento da superfície do objeto tenha uma aparência de escada em vez de uma superfície contínua lisa. Os parâmetros de obtenção de acabamento suave da superfície e os de maior velocidade na fabricação estão em direções opostas. Há, em princípio, concorrência direta entre velocidade e qualidade de impressão, estando mediando essa relação a espessura da camada de impressão (DOLENC, 1997 apud. KWON, 2002).

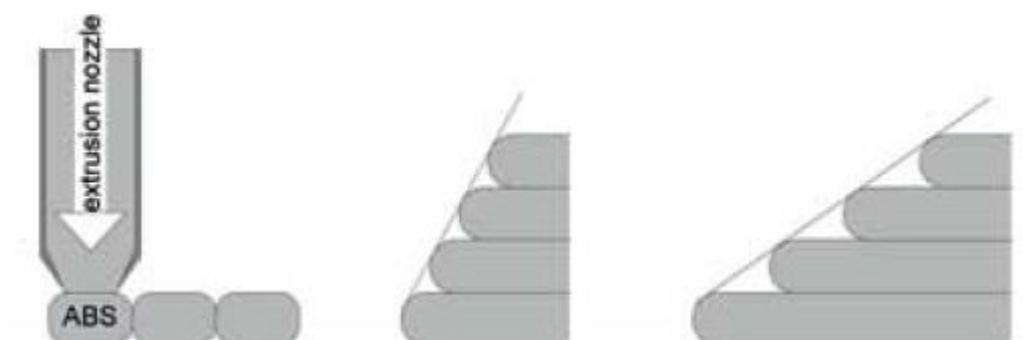


Figura 49 - Relação da espessura e inclinação da camada com a suavidade da superfície (STRAUB, 2013)

Strauß (2013) aponta que, na maioria dos sistemas o usuário pode selecionar diferentes níveis de resolução. Os ajustes devem ocorrer na configuração do equipamento de impressão bem como no arquivo digital do objeto.

A direção em que a impressão é realizada relaciona-se com a capacidade de semelhança do objeto digital com o físico, e também modifica o comportamento dos esforços mecânicos no objeto. O posicionamento do objeto na mesa de impressão influencia na resistência aos esforços mecânicos. Esse comportamento é atribuído às propriedades anisotrópicas, e é uma grande desvantagem da impressão 3D em relação a processos fabris subtrativos e formativos, uma vez que estes podem possuir propriedades isotrópicas.

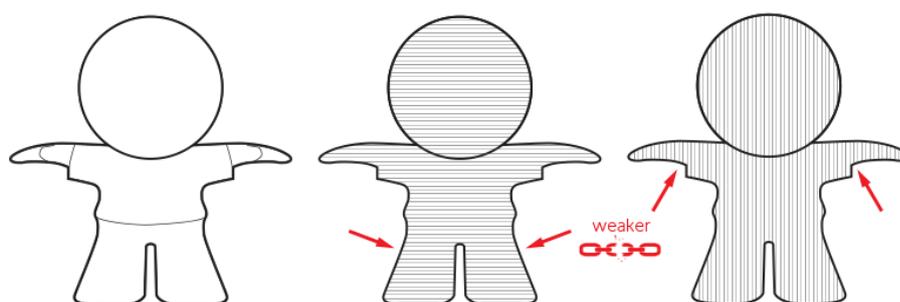


Figura 50 - Propriedades anisotrópicas das camadas do objeto (MATERIALISE, 2017)

Na ciência dos materiais e na mecânica dos sólidos, os materiais ortótropos possuem propriedades que diferem ao longo de três eixos. Eles são um subconjunto de materiais anisotrópicos, porque suas propriedades mudam quando avaliadas de diferentes direções.

A grande variedade de métodos de fabricação aditiva resulta na possibilidade de elas serem classificadas de várias formas. Hopkinson e Dickens (2006) definem as categorias dos métodos de Manufatura Aditiva com base nos estados físicos iniciais dos materiais a serem solidificados, classificando entre sólidos, líquidos e em pó.

Apesar de Gardiner (2011) argumentar que essa categorização não é particularmente útil para a Arquitetura e Construção - porque se concentra no estado inicial dos materiais em vez de se ater ao processo que cria os objetos finais – essa classificação continua sendo utilizada por outros autores, como sugere a pesquisa de Labonnote (2016).



Figura 51 - Diferentes estados do material antes da deposição; a) sólido, b) pastoso, c) em pó e d) líquido (LABONNOTE et al., 2016)

Como resposta, Gardiner (2011) propõe uma nova classificação, feita com base em listagens e descrições de métodos de manufatura aditiva, descritos no relatório do estado da indústria de Wohlers (2010).

As categorias utilizadas por Gardiner (2011) são: manufatura por deposição (podendo ser deposição de materiais pré-misturados, deposição de material derretido ou deposição por jato de tinta); manufatura por mudança de estado seletiva (utilizando catalizadores, derretimento por sinterização seletiva usando laser, ou feixe de elétron, cura por luz UV, aglutinação com adição seletiva de um material aglutinante a um material em pó) e manufatura por reação química (adição seletiva de um material sobre o outro para criar uma transformação química).

Holger Strauß (2013) utiliza a classificação baseada na sistemática do leque de material disponível a cada método (anexo1).

A classificação aqui utilizada baseia-se na sistematização dos métodos mais difundidos no mercado (REDWOOD et al, 2017), a partir do padrão definido pela ISSO/ASTM 52900 no ano de 2015, selecionando dentre eles os que possuem maior estabilidade e possibilidade de uso na arquitetura.

2.2.1.1 Estereolitografia - SLA¹⁸

Significa o curar finas camadas de um fotopolímero fluido sensível à luz. Lâmpadas de halogéneo podem servir como fonte de luz.

O objeto é gerado num aquário de resina epóxi ou resina acrílica. Os traços da fonte de luz provenientes do modelo de computador curam a resina. Para imprimir estruturas “em balanço”, estruturas extras chamadas de suporte são geradas pelo software do sistema automaticamente, e depois retiradas à mão.

¹⁸ *Stereolithography*



Figura 52 - Produtos impressos em uma gama de resinas SLA (FORMLABS, 2017)

As impressões de SLA são isotrópicas porque as camadas são quimicamente ligadas entre si à medida que se imprimem, resultando em propriedades físicas quase idênticas nas direções x, y e z. Se a peça é impressa em paralelo ou perpendicular à placa de construção, as propriedades finais do material da peça não serão impactadas.

2.2.1.2 Sinterização Seletiva a Laser - SLS¹⁹

Com a sinterização a laser, o objeto é criado de forma semelhante à estereolitografia, no entanto um material em pó específico é usado como material de base, em vez de resina fluida.

Na manufatura aditiva o termo sinterização significa derreter algum material em pó usando uma temperatura de fusão baixa. A energia da fonte de luz age seletivamente e faz com que o material derreta.

Depois de uma camada de pó ser sinterizada, mais pó é depositado sobre a plataforma de trabalho, criando a próxima camada. A luz infravermelha mantém a câmara de produção em uma temperatura imediatamente abaixo da temperatura necessária ao processo de sinterização, o que possibilita que, com um pequeno acréscimo seletivo de energia, o material seja sinterizado. Esse procedimento evita a distorção do objeto que seria causada pelo aquecimento abrupto, e melhora a fusão com a camada anterior. Depois da conclusão do processo, o pó não sinterizado é retornado para o recipiente de armazenamento para ser reutilizado quando completado com um novo pó.

¹⁹ *Selective Laser Sintering*

2.2.1.3 Selective Laser Melting (SLM) e Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

São dois processos de fabricação de aditivos metálicos que pertencem à família de impressão 3D de fusão de pó. As duas tecnologias têm muitas semelhanças: ambas usam um laser para fundir ou derreter seletivamente as partículas de metal em pó, unindo-as e construindo uma parte camada por camada. Os materiais utilizados em ambos os processos são os metais que apresentam uma forma granular.

As diferenças entre o SLM e o DMLS são os fundamentos do processo de ligação de partículas: o SLM usa pós metálicos com uma única temperatura de fusão e derrete completamente as partículas, enquanto, no método DMLS, o pó é composto de materiais com pontos de fusão variáveis que se fundem em nível molecular com temperaturas mais elevadas que no método SLM.

O SLM produz peças de um único metal, enquanto o DMLS produz peças de ligas de metais. Tanto o SLM como o DMLS destinam-se ao uso em aplicações industriais para criar produtos de engenharia de uso final.

2.2.1.4 Modelagem por Deposição e Fusão – FDM²⁰

As camadas do arquivo 3D são consecutivamente depositadas na plataforma de trabalho. O material é derretido a cerca de 220 °C e aplicado com um bico de extrusão com alguns décimos de diâmetro. A nova camada é comprimida na anterior para garantir que as camadas individuais permaneçam unidas.

Uma estrutura de suporte é necessária para partes “em balanço” porque os modelos têm a sua primeira camada impressa diretamente sobre a plataforma de construção e as camadas seguintes são impressas diretamente sobre a anterior. Sem o suporte temporário gerado pelo software, as partes “em balanço” ficariam “soltas no ar”.

Dependendo do modelo de impressora os suportes temporários podem ser depositados através de um bico secundário especialmente para o material de apoio. O material dos suportes é removido do produto manualmente, ou, no caso do uso de bico secundário, pode ser removido na própria impressora em um pós-procedimento automático de banho em solvente.

A impressão FDM é a mais difundida entre os modelos *desktop*; seu preço acessível tem papel importante na arquitetura. Sendo o primeiro contato de muitos

²⁰ Fused Deposit Modeling

arquitetos com a tecnologia, é a porta de entrada para experimentação de baixo custo. O fácil acesso a essas máquinas e o sucesso comercial das empresas, as políticas de crescimento da indústria nos Estados Unidos, que visavam à implantação de impressoras 3D em cada escola de ensino fundamental, e o *Boom e Hype* gerado em torno delas pelos seus principais divulgadores, ao veicularem discursos de que em breve todos teriam uma impressora 3D em casa, influenciaram a multiplicação dos primeiros ensaios de arquitetura produzida com impressoras desktop FDM.

2.2.1.5 Contour Crafting

A técnica Contour Crafting foi desenvolvida sob a direção principal do Dr. Behrokh Khoshnevis na University of Southern California. A técnica foi revelada em 1996, e é o método de impressão de cimentícios mais antiga em aplicação e desenvolvimento. A equipe coordenada por Khoshnevis publicou propostas de aparatos visando à construção totalmente automatizada de moradias unifamiliares, edifícios verticais e até proposições para a construção de abrigos/habitação/estruturas na Lua ou Marte (KHOSHNEVIS et al., 2005).

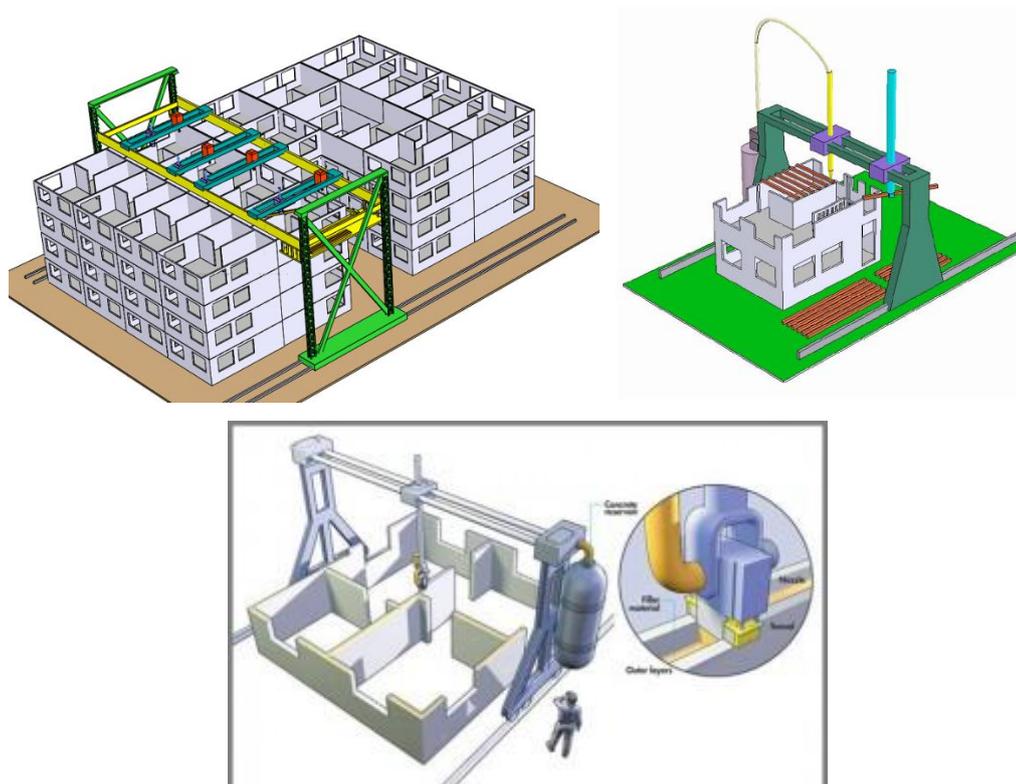


Figura 53 - Propostas unifamiliares e edifícios verticais por Contour Crafting (KOSHNEVIS, 2006)

A técnica de deposição *Contour Crafting* é projetada com a capacidade de fabricar elementos com dois materiais. Composta de dois bicos de deposição que depositam concreto, e um bico rotativo de deposição interna, pode ser usado para

depositar o mesmo material como uma estrutura interna, ou pode ser usado para injetar material de preenchimento em grandes quantidades. Esse segundo material pode potencialmente ser usado para adicionar um material com capacidade de isolamento acústico, térmico ou na impermeabilização, embora os exemplos até o momento indiquem que o principal uso desse bico auxiliar é criar estrutura interna (KHOSHNEVIS, 2011).

O bico de extrusão do *Contour Crafting* possui pelo menos quatro versões. Os desenhos anteriores incorporavam espátulas móveis no topo e laterais que permitem um acabamento liso nas superfícies externas, deixando um acabamento mais imperfeito no interior do objeto. Os bicos desenhados posteriormente removeram esse recurso em favor de espátulas unicamente nas laterais. Posteriormente, a concepção do bico de extrusão permitiu tornar o conjunto mais sofisticado, mudando de um único bico para um conjunto com quatro. Esse desenho contempla dois bicos para extrusão do contorno externo, um para extrusão da geometria interna, e um quarto bico para colocar o enchimento dos vazios internos (KHOSHNEVIS apud. GARDINER, 2011).

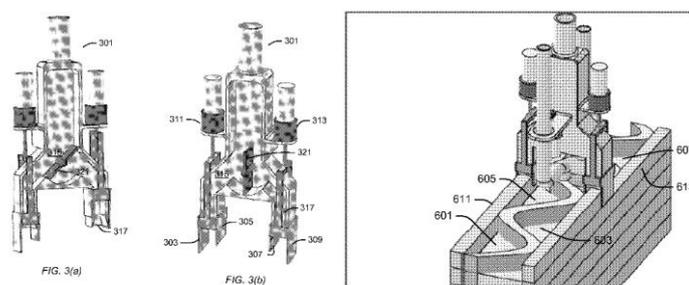


Figura 54 - Bico para formar uma parede por deposição com um interior em forma de nervura, (KOSHNEVIS, 2011)

Embora se afirme que o método *Contour Crafting* permita a extrusão de uma ampla gama de materiais (HAYMOND, 2008), apenas dois tipos de materiais têm sido demonstrados: pastas de cerâmica nos casos de pequena escala e concreto nos casos de escala real.

Ensaio com o acréscimo de aditivos e bentonita - uma argila de base mineral - ao concreto aumentaram a plasticidade da pasta. No entanto, mesmo com essa nova composição não foi resolvida completamente a questão da dificuldade do método em realizar formas em balanço como as conseguidas utilizando pastas cerâmicas em pequenas escalas.

Um dos pontos principais desse método é como o material mantém sua forma desejada durante a cura do concreto. É necessário ao *Contour Crafting* utilizar materiais com rápida cura e baixos níveis de encolhimento (BUSWELL et al., 2007).

Gardiner (2011) observa que as paredes, realizadas pelo método *Contour Crafting* na escala real, são completamente verticais, ou seja, a repetição do mesmo contorno, camada após camada. Gardiner usa o termo “2.5D” para se referir à impressão como essas, que representam uma repetição vertical de um único perfil, sem curvatura vertical, ausentes da capacidade de produzir elementos de forma livre.

Le et al (2006) Sugerem o uso do termo *Concrete Printing* para denotar as impressões com esse mesmo processo, desde que os desenvolvimentos caminhem em direção à liberdade de formas inteiramente tridimensionais. O *Concrete Printing* é diferenciado do *Contour Crafting* pelo menor bico de deposição, permitindo maior controle da geometria interna e externa.

2.2.1.6 Binder Jet

Enrico Dini, fundador da empresa D-Shape registrou a patente de sua primeira impressora 3D em 2006. A técnica inicial descrita nessa patente usava resinas sintéticas para aglomerar seletivamente areia dentro de uma plataforma de construção. Essa impressora possuía custos de manutenção elevados, bem como ineficiências quanto à inflamabilidade, à toxicidade e ao custo da resina inicialmente escolhida como material aglutinante (DINI et al., 2008).

Uma segunda patente (DINI, 2009) revelou uma mudança no foco da empresa, substituindo a impressora de ligantes polímeros inorgânicos, passando a operar com aglutinantes à base de magnésio, que com uma reação química, ligam o arenito que leva em torno de um dia para solidificar como uma espécie de pedra sintética. Essa foi uma mudança significativa para o potencial do processo, afastando-se de um processo potencialmente de alto custo, problemático e tóxico, indo em direção a um método que é ambientalmente benigno e usa matérias-primas de relativo baixo custo, predominantemente areia e óxidos e cloretos derivados de água do mar (GARDINER, 2011).

A D-Shape imprime seletivamente um material sobre um leito de material composto de mistura de areia, ocorrendo uma reação química entre o líquido e o catalisador presente na mistura de areia. O resultado é um material semelhante ao arenito (DINI, 2009). Durante esse processo de transformação de areia granular em

arenito, que leva aproximadamente uma hora, camadas subsequentes de areia são depositadas na plataforma de compilação e a próxima camada é impressa. Não é necessária cura rápida do material catalisado para atingir um estado sólido, materiais em transformação são mantidos dentro da plataforma de impressão. As camadas seguintes podem prosseguir rapidamente, enquanto a reação catalisadora continua acontecendo nas camadas abaixo. Esse método de fabricação possibilita suporte para geometrias em balanço. Como a areia é seletivamente transformada em pedra dentro de um leito de areia, o próprio leito funciona como suporte para o uso de geometrias 3D de forma livre.



Figura 55 - Objeto Radiolaria antes e depois de retirado o suporte de cama de areia (DINI, 2009)

Enrico Dini, com a D-Shape, foi capaz de demonstrar sua capacidade de fabricar objetos de forma livre, rapidamente após a idealização da impressora. O pavilhão “Radiolaria”, desenhado por Andrea Morgante, impresso em escala reduzida, demonstra a capacidade da D-Shape para a criação de objetos tridimensionais de formas virtualmente ilimitadas, restrita apenas pela força dos materiais usados e pela resolução de impressão, com o mínimo de detalhe limitado a aproximadamente 20mm nos eixos X e Y e 5mm no eixo Z.



Figura 56 - Impressora D-Shape (DINI, 2009)

A máquina é constituída por uma estrutura rígida de 4 x 4 metros, uma grande cama plana e um conjunto de impressão personalizado com capacidade para 300 bicos. O software CAD-CAM conduz a impressora durante o processo de construção do objeto, depositando gotículas de aglutinante da superfície de areia.

2.2.1.7 Solda Robótica – Impressão Direta de Metal

Desenvolvida em uma parceria inicialmente entre a Autodesk e o Joris Laarman Lab, o processo de solda robótica usa um robô industrial combinado com uma máquina de solda e software desenvolvido para conduzir essa combinação. Podendo produzir desde peças pequenas a grandes construções - com essa tecnologia é possível imprimir estruturas 3D fortes e complexas (MX3D, 2017).



Figura 57 - a) Impressão por solda (MX3D, 2015) b) impressão com braço robótico (LAARMAN, 2013)

O robô pode imprimir com metais, como aço, aço inoxidável, alumínio, bronze ou cobre, sem a necessidade de estruturas de suporte. Ao adicionar pequenas quantidades de metal fundido de cada vez, é capaz de imprimir estruturas com grandes balanços, sem necessidade de suportes (MX3D, 2017).

2.3 O cenário global da impressão 3D

A indústria da impressão 3D ultrapassou os 5 bilhões de dólares em 2015, com 278 mil impressoras domésticas, com valor até de 5 mil dólares, sendo vendidas naquele ano (WOHLERS, 2016). A plataforma on-line “3D Hubs” conecta mais de 7 mil redes locais de serviço de impressão ao redor do mundo.

Nos últimos cinco a 10 anos, a impressão 3D explodiu em popularidade tanto no consumo pessoal quanto nos negócios. Nos anos recentes, a tecnologia de impressão 3D continuou a evoluir e atrair o interesse de alguns dos principais mercados à medida que se tornou mais versátil e econômica. O declínio dos custos teve o maior impacto na difusão (CORE-BAILLAIS et al., 2017).

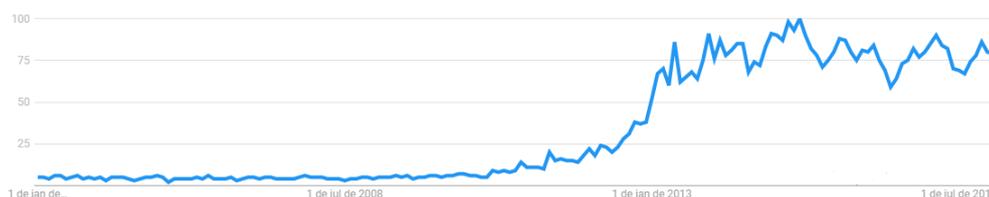


Figura 60 - Gráfico do interesse pelo termo 3D printing entre o período de 2004 e 2017 (GOOGLE TRENDS, 2018)

A partir de 2017, o crescimento da impressão em 3D para uso pessoal começou a congelar. Embora o mercado consumidor 3D tenha aumentado e os modelos desktop tenham se tornado mais acessíveis, o interesse em possuir um equipamento em casa manteve-se somente por entusiastas. Ainda que as impressoras 3D ofereçam um potencial interessante para as famílias, o equipamento não foi identificado como um eletrodoméstico (TAGEN, apud RIVERA, 2017). O número de buscas realizadas no site Google indica uma estabilidade no interesse pelo tema a partir de 2014.

2.3.1 Aplicação em campos correlatos

Kolarevic (2001) defende que se deve olhar para essas demais indústrias e tentar aprender com elas como melhorar a indústria da construção. A análise em outros setores serve como associações aos desenvolvimentos na arquitetura e construção. A prática da interdisciplinaridade é defendida por muitos arquitetos e pesquisadores como Patrick Schumacher (2017), Michael Hansmeyer (2012) e Neri Oxman (2015), justificando que os conhecimentos adquiridos em campos correlatos podem ser aplicados por meio de intercâmbios.

Há crescente apelo pela multidisciplinaridade e interdisciplinaridade na arquitetura. Esse aspecto da arquitetura contemporânea, que também se faz presente na realidade de outras profissões, será analisado.

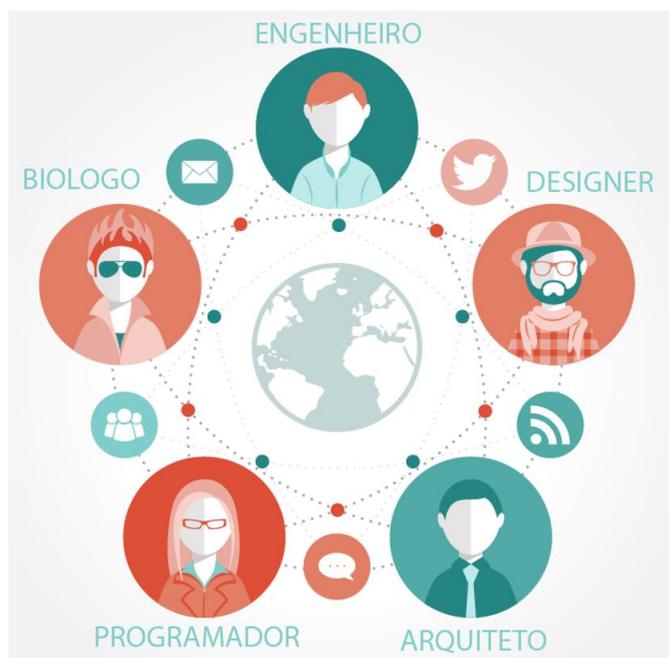


Figura 61 - Aspecto multidisciplinar do arquiteto contemporâneo (SILVA, 2018)

A manufatura aditiva como um conceito de fabricação universal possui abordagem de pesquisa correlata com outras disciplinas. Verificam-se possibilidades de relações no uso das descobertas no campo da tecnologia dos materiais, geometrias em látice e lógicas de fabricação. Além de compartilhar dos mesmos materiais e equipamentos, com softwares cada vez mais universais, como o advento da programação visual²¹, com o uso proliferado de programação computacional e programas de modelagem cada vez mais versáteis, os limites entre as atuações de profissionais ligados ao design e fabricação ficam mais transponíveis. Uma demonstração disso é o crescimento de atuação transdisciplinar²² também, esfera acadêmica (LABONNOTE, 2017).

2.3.1.1 Medicina

Apesar de não ser considerada uma área correlata à arquitetura até então, a medicina é uma das áreas que mais vislumbram e aplicam o uso da manufatura aditiva. Os artigos publicados sobre pesquisas do uso de impressoras 3D na medicina constituem a maior produção acadêmica relacionada à impressão 3D. Isso reflete a consolidação da manufatura aditiva no campo médico. É visto, principalmente, na

²¹ Softwares que possibilitam realizar programações computacionais através de uma interface gráfica, sem que seja necessário conhecimento de linguagem computacional.

²² A transdisciplinaridade é uma abordagem científica que visa à unidade do conhecimento. Dessa forma, procura estimular uma nova compreensão da realidade, articulando elementos que passam entre, além e através das disciplinas, numa busca de compreensão da complexidade do mundo real.

engenharia de tecidos ósseos e próteses, nos quais entre as vantagens, está a redução de custo com personalização (ROPER, 2015).



Figura 62 - Implantes e próteses impressos por manufatura aditiva

O que mais chama atenção, no entanto, é que, apesar da grande diferença entre as áreas, muitos dos limites encontrados por pesquisadores ligados à medicina correspondem a problemas identificados como vinculados à construção de edifícios.

O principal foco das pesquisas de implantes médicos é relacionado à impressão de microgeometrias complexas em estruturas em látice²³, as quais, após os implantes, facilitam o crescimento das células no local. Existem softwares desenvolvidos especialmente para aplicação. É pesquisado, ainda, a respeito da impressão dessas estruturas, como o volume dos poros influenciam a capacidade mecânica de absorção de impactos.

Com alguns avanços sobre mecânica dos materiais vindo de pesquisas médicas como Farzadi (2015). Verificou-se que a ligação no tocante ao tempo de intervalo dado entre a impressão de uma camada e outra influencia a resistência do material cerâmico proposto para implante.

Ventola (2014) aponta as dificuldades com a regulamentação como sendo uma barreira significativa que impede a difusão da manufatura aditiva na medicina. Segundo o autor, as aprovações ocorrem em solicitações de uso simplificado, mas é prevista dificuldade em regular produções em larga escala.

2.3.1.2 Aeronáutica

No setor aeronáutico, o uso da impressão 3D vem da expectativa de diminuir o peso da aeronave, proporcionando economia de combustível. Começa porque a ferramenta se revela como ideal para a solução do problema de peso da aeronave, por conseguir produzir geometrias geradas por softwares de otimização.

²³ Padrões matemáticos de grupos de pontos organizados simetricamente.

Na aeronáutica, o principal espaço de utilização da manufatura aditiva é a otimização de peças. Esse conceito já foi proposto para arquitetura pelo escritório ARUP, e softwares específicos para essa finalidade já são usados na indústria da construção.

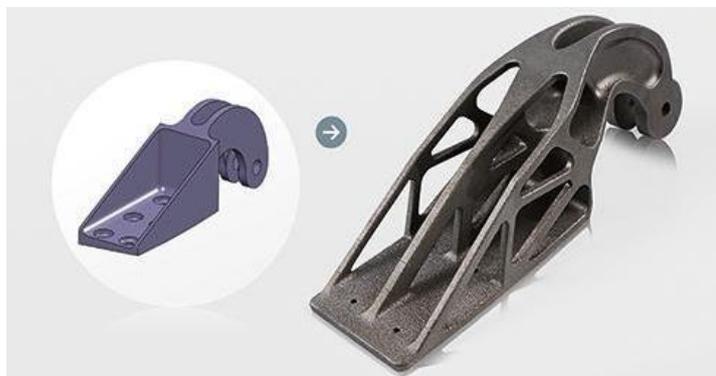


Figura 63 - Peça otimizada para redução de peso na aeronave (BOEING, 2016)

Muita perda em alumínio aeroespacial bastante caro pode ser evitada com a geração de um novo desenho por software, com métodos de otimização de topologia. O resultado desses processos chegam a economizar metade do material e manter a mesma capacidade estrutural. Remover esse peso é essencial para a economia de combustível usado pela aeronave (BOEING, 2016).

2.3.1.3 Automobilístico



Figura 64 - Protótipo de carro Citroen (MATERIALISE, 2016)

O setor automobilístico caminha na mesma direção que o aeronáutico, empregando principalmente técnicas de redução de peso. Essas técnicas de otimização são facilmente correlacionáveis com a arquitetura e a construção, Neri

Oxman e Michael Pawlyn já exploram a biomimética como uma ferramenta da arquitetura, considerando que a redução de peso em um elemento arquitetônico desencadeou a redução de peso de toda a estrutura do edifício, gerando economia de recursos naturais e financeiros e novas possibilidades estéticas.



Figura 65 - Otimização de topologia para peças de veículos (TOYOTA, 2015)

Ao final de um processo de otimização, o volume do assento de carro da Toyota foi reduzido em 72% em peso, o correspondente de 25kg para 7kg. Além disso, houve também redução da capacidade térmica. Otimizações como essa podem ser facilmente aplicadas à arquitetura. Nesse caso houve uso de um algoritmo que facilitou a manipulação do arquivo digital e do preparo do arquivo de impressão: o tamanho do arquivo STL estimado era de 250 GB, enquanto o tamanho do arquivo conseguido com metadados²⁴ foi de apenas 36 MB.

2.3.1.4 Moda

"Moda é arquitetura: é uma questão de proporção."

(Coco Chanel, 1971)"

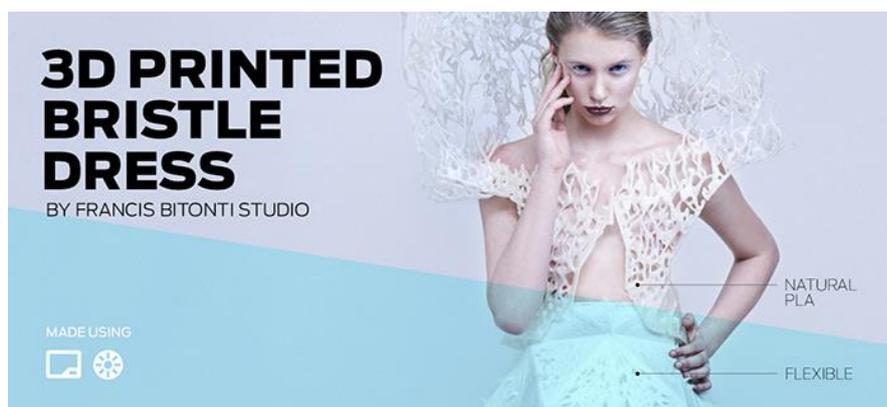


Figura 66 - The Bristle Dress, por Francis Bitonti Studio (BITONTI, 2014)

²⁴ Metadados ou Metainformação são dados sobre outros dados, geralmente uma informação inteligível por um computador.

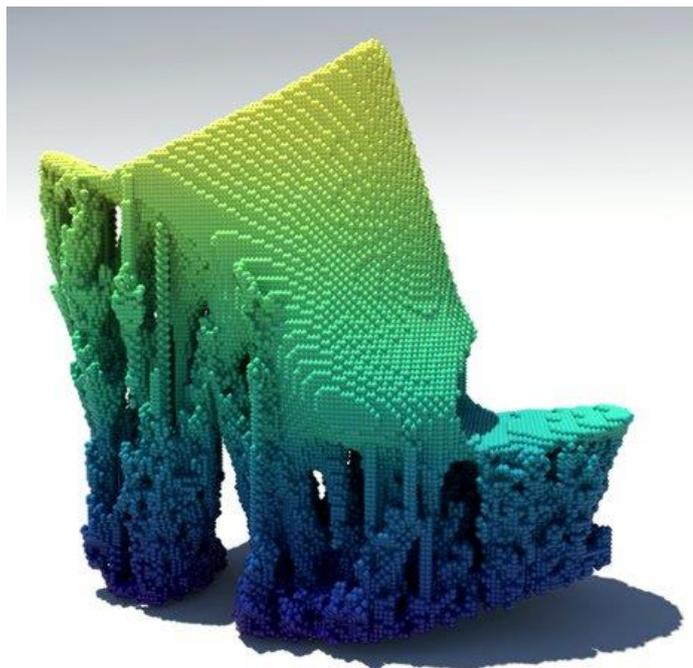


Figura 67 - Francis Bitonti sapato "Molecule" impresso em 3D (BITONTI, 2014)

O compartilhamento de um mesmo software por diferentes indústrias indica uma possível versatilidade dos profissionais em permear por diferentes áreas. O arquiteto Francis Bitonti é um dos maiores referenciais da moda produzida por manufatura aditiva. O setor contou também com propostas da arquiteta Zaha Hadid. Essas interações indicam não a versatilidade desses profissionais, mas mostram uma mesma corrente estética permeando as diferentes disciplinas visuais.



Figura 68 - Sapato desenhado por Zaha Hadid (HADID, 2013)

Esse olhar de como a implementação da tecnologia acontece com sucesso em outros setores é um ponto de partida para entender como pode se enxergar o uso eficiente da manufatura aditiva na arquitetura e construção. Além disso, pode-se notar relação no tocante à evolução de outras disciplinas.

2.3.1.5 Design

Por compartilhar uma origem em comum, o Design, especialmente o de mobiliário, pode ser o campo em que o uso da impressora 3D seja o mais correlato à arquitetura. Essa relação vem desde o interesse e atuação de arquitetos nesse campo há mais de um século, à semelhança na escala e linguagem, e, portanto, em estratégia de materialização.



Figura 69 - Design de mobiliário proposto por arquitetos: a) Alvin Huang b) Joris Laarman Lab c) Zaha Hadid Architects

Por ser um campo correlato, as experiências adquiridas no design podem facilmente ser transpostas em experiências arquitetônicas, a exemplo da prática de Joris Laaman, que iniciou com a produção de mobiliário, e passou a empregar as mesmas metodologias, materiais e equipamentos na fabricação arquitetônica (LAARMAN et al., 2017).

2.4 Aplicação na Arquitetura e Construção

Neste tópico será realizado um mapeamento de instituições e empresas que impulsionam e possuem relevância no contexto de pesquisa e desenvolvimento com uso de impressoras 3D aplicadas à arquitetura e à construção.

Em 2005, Gramazio e Kohler construíram o primeiro laboratório robótico para pesquisas de desenho arquitetônico e processos de fabricação, no ETH Zurich. Em 2013 foi publicada uma compilação das pesquisas realizadas no laboratório. Segundo os autores, trata-se de uma perspectiva antes inexistente na arquitetura, apresentando reflexões teóricas e descobertas, extensiva documentação visual e um catálogo de laboratórios e ferramentas. A compilação das pesquisas dos autores sugere que a cultura de construção digital seja um campo a ser delineado por arquitetos.



Figura 70 - Levantamento das principais instituições (vermelho) e empresas (verde) (SILVA, 2017)

O conhecimento e desenvolvimento da implementação da impressão 3D na arquitetura e construção advêm de 3 tipos de iniciativas: instituições acadêmicas, empresas privadas e profissionais de arquitetura.

Dentre as maiores empresas internacionais de construção responsáveis por realizar projetos de alta complexidade - como a AECOM, Royal BAM Group, ACS e ARUP- somente a ARUP foi identificada nos projetos estudados. O investimento privado ainda é pouco, se comparado aos realizados em outras áreas, como apontava Gardiner, em 2011. O cenário de implementação da tecnologia na prática cotidiana, com um maior número de projetos, é mais visto em empresas de pequeno porte e *start-ups*.

A pesquisa em instituições também vem ganhando espaço de foco exclusivo para a manufatura aditiva. Instituições como o MIT, TU Eindhoven, UCL, IAAC, ETH-Zurich, Bartlett e AA na Inglaterra, University of Stuttgart e Politecnico di Milano foram identificadas como as mais importantes nesse cenário, ainda não tão explorado quanto outros campos da arquitetura.

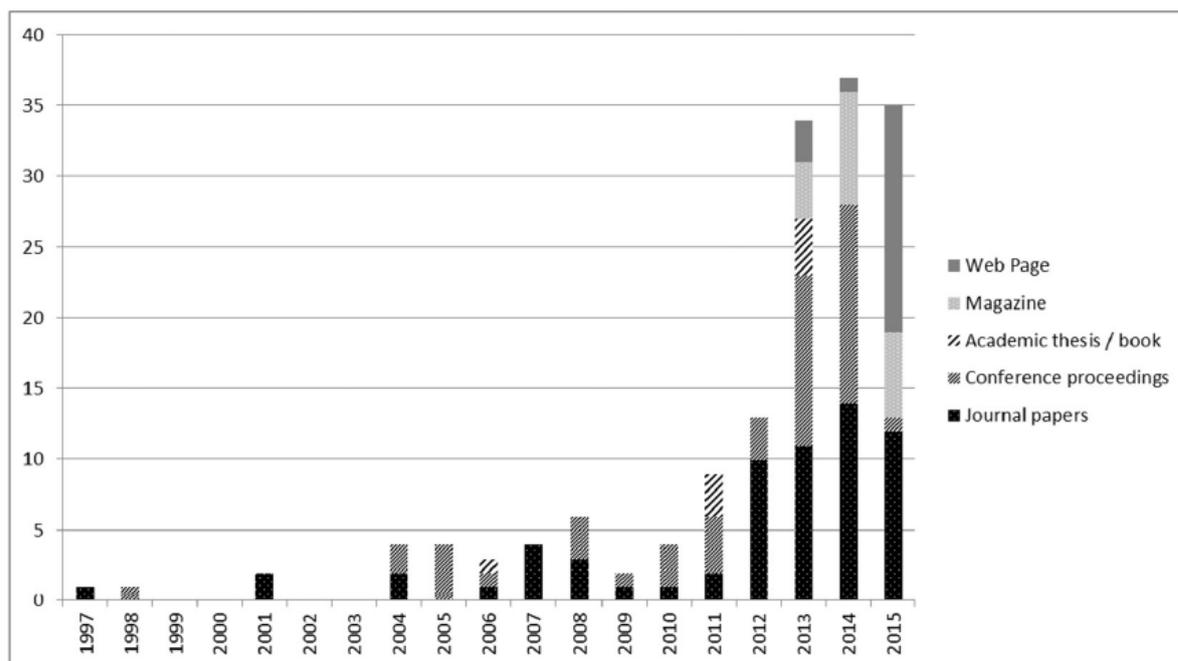


Figura 71 - Evolução no número e tipo de publicação acadêmica sobre impressão 3D aplicada à arquitetura nos últimos 20 anos (LABONNOTE, 2017)

O material mais pesquisado pela ciência dos materiais, aplicada à impressão 3D em arquitetura, é o concreto, com aproximadamente metade da publicação em artigos acadêmicos (LABONNOTE, 2017).

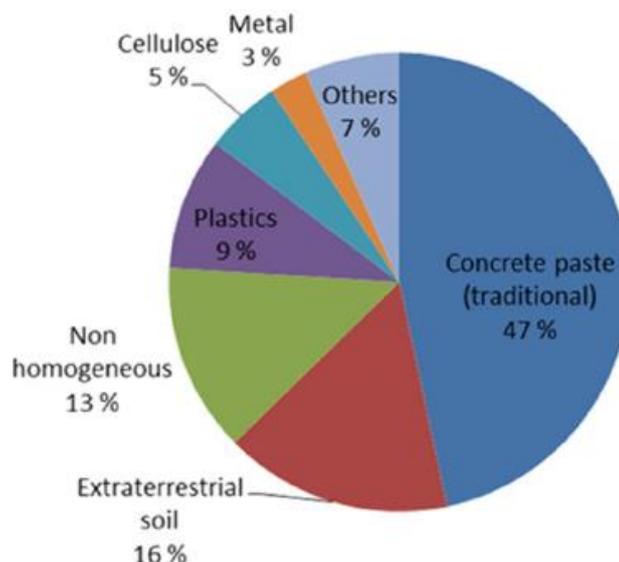


Figura 72 - Publicação acadêmica sobre ciência dos materiais aplicados a MA na AEC (LABONNOTE, 2017)

Na América do Sul, o levantamento feito por Sperling et al. (2015) analisa o continente quanto à presença de laboratórios de fabricação digital e quanto ao tipo de equipamento presente nos laboratórios. O Brasil, segundo o estudo, possui o maior número de laboratórios, e a impressora 3D é o equipamento mais difundido, seguido por equipamentos de corte a laser e em sequência equipamentos de corte por fresa.

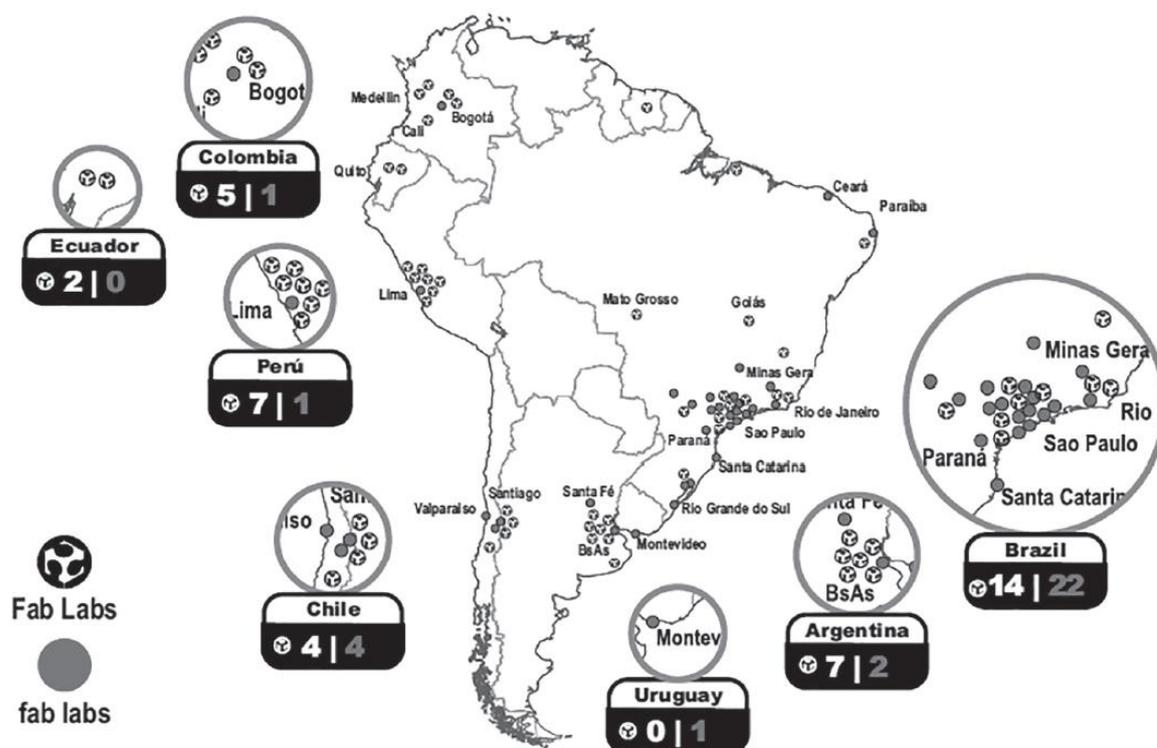


Figura 73 - Mapeamento de laboratórios de fabricação digital na América Latina. (SPERLING ET AL, 2015)

Dentre as instituições mapeadas, foi analisada a produção teórica dos últimos anos. Esta dissertação é implementada com informações da produção de seus laboratórios e grupos de pesquisa, levantando a área de interesse e investigando mais profundamente algumas de suas publicações, dentre as quais são estudadas as propostas de: Joris Laarman no IAAC de Barcelona; a proposta dos *Mini Builders*, pequenos robôs construtores, também do IAAC; os trabalhos conduzidos pelos professores Fabio Gramazio e Matthias Kohler, à frente do Laboratório de Fabricação Robótica para arquitetura do ETH Zurich; e os diferentes Pavilhões de Pesquisas propostos pelo ICD, de Achim Menges, em colaboração com o ITKE, na universidade de Stuttgart.

Algumas empresas de impressão 3D possuem foco exclusivo na impressão para arquitetura e construção, atuando somente nesse setor, como a italiana D-shape, a chinesa Win-sun, a americana Branch e a holandesa Aectual. Outras empresas, como a Wasp, são fabricantes de impressoras comerciais, no entanto destinam setores para essa finalidade, ou possuem projetos voltados para a AEC.

Dentre os profissionais e escritórios ocupando posição de destaque no meio da manufatura aditiva, os mais proeminentes são o DUS Architects, Joris Laarman Lab. Emerging Objects e SHoP Architects.

2.5 A linha do tempo da impressão 3D para arquitetura e construção

A corrida pela publicidade, possibilitada pelo súbito interesse do público no uso da tecnologia, tem suas vantagens e desvantagens. Em busca de propaganda, só os pontos positivos são divulgados em boa parte do material publicado em blogs e sites. Isso é um ponto negativo. O positivo é o crescente número de propostas, algumas delas originalmente interessantes.

Os casos investigados por essa linha do tempo foram selecionados por uma avaliação do potencial de otimização de suas propostas, grau de inovação, nível de detalhe dos dados ou resultados divulgados, mudança no papel do arquiteto ou relação com processos de projetos contemporâneos.

A linha do tempo construída aqui se inicia em 2009 com a impressão, do pavilhão projetado por Andrea Morgante, executado pela empresa D-Shape de Enrico Dini. Apesar de não ter sido impresso em escala real, o objeto marca novas possibilidades para arquitetos quanto à maior liberdade de formas em impressoras de concreto.



Figura 74 - Modelo para o projeto Radiolaria (DINI, 2009)

Gardiner afirmou em 2011 que pouco foi explorado no que chamou de emergente campo da impressão de construção 3D. De lá para cá, algumas explorações aconteceram, cabendo investigar sob que moldes e qual o alcance obtido. Um dos projetos propostos por Gardiner em sua tese de doutorado recebeu o incentivo da D-shape, juntos possuíam o interesse de participar de uma exposição. Segundo o autor, a ideia foi abandonada devido a alguns fatores, sendo os principais: a pouca garantia de atendimento aos requerimentos de segurança exigidos pelos organizadores; e o receio de a empresa não entregar a estrutura a tempo. O projeto foi abandonado, no entanto alguns protótipos na escala real foram realizados

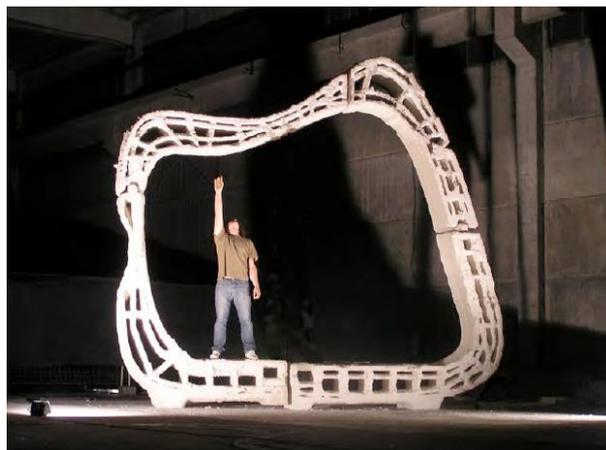


Figura 75 - Secção do projeto de Gardiner em colaboração com a D-Shape, (GARDINER, 2010)

A pesquisa de Gardiner (2011) consistiu em uma etapa de revisão bibliográfica e outra de investigação projetual. A investigação projetual de propostas diferentes visavam explorar ao máximo a possibilidade de Research by Design. Gardiner citou como dificuldade a ausência de um software próprio para a impressão 3D de arquitetura. Hoje a D-Shape, empresa que colaborou com suas pesquisas, já possui um software de validação de arquivo próprio. O Rhinoceros, software que utilizou, hoje possui pluggins disponíveis para a finalidade de controle de movimentos de braços robóticos.

Em outubro de 2012, o arquiteto Brian Peters adaptou uma impressora 3D desktop, adicionando um bico para extrusão de material cerâmico. Impressão 3D com argila já existia há mais de uma década, no entanto a adaptação realizada por Peters é incluída nessa linha do tempo por simbolizar um processo de adaptação de equipamento realizado com relativa facilidade em seu próprio estúdio, marcando a iniciativa do arquiteto de personalizar seus meios de materialização de ideias.

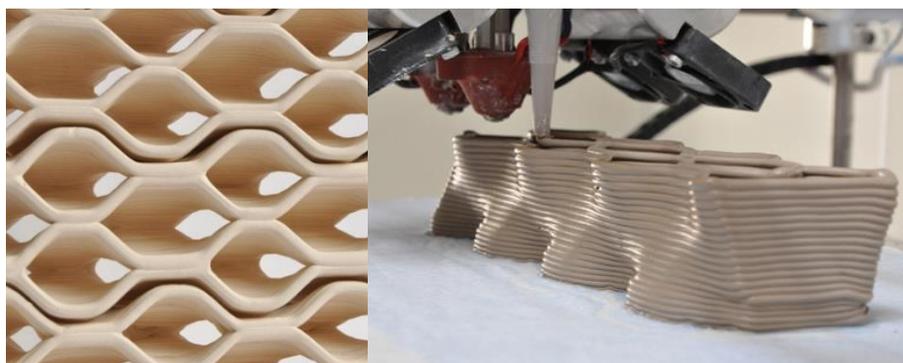


Figura 76 - Impressora adaptada para impressão de tijolo cerâmico (PETERS, 2013)

Em dezembro de 2013, o arquiteto Adrian Priestman alega ter desenhado o primeiro componente, fabricado com uma impressora 3D, aprovado para uso pela

indústria da construção. O elemento desenhado por Priestman foi testado em ventos e condições climáticas extremas por duas mil horas antes de ter sido aprovado pela construtora, segundo relato do arquiteto.

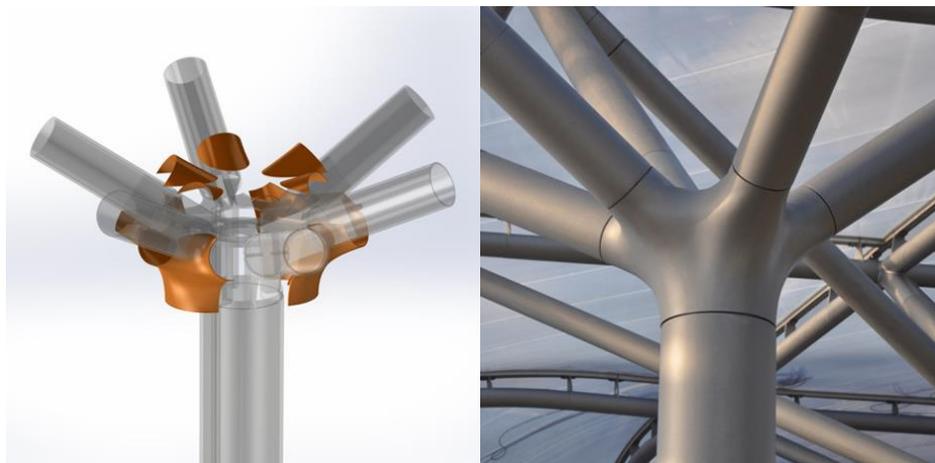


Figura 77 - Componente desenhado e instalado após testes de resistência (PRIESTMAN, 2013)

Os arquitetos Michael Hansmeyer e Benjamin Dillenburger, revelaram, em 2013, o projeto intitulado “Digital Grottesque”, através do qual pretendiam criar uma nova estética. Os arquitetos, que dividem o mesmo departamento na Universidade de Zurich, dizem que a geometria complexa resultou de um algoritmo simples e que, apesar de não ser possível desenhar as formas a mão, é possível fabricá-las.



Figura 78 - "Digital Grottesque" (HANSMEYER; DILLENBURGER, 2013)

Algumas das explorações realizadas por arquitetos, como as conduzidas por Ronald Rael e Virginia San Fratello pela universidade de Berkeley, possuem artigos escritos e tiveram propósito investigativo determinado. Rael e Fratello investigam um amplo espectro dentro do campo da manufatura aditiva aplicada à arquitetura: materiais, componentes do edifício, custo, velocidade, durabilidade e possibilidades geométricas.

O perfil de Rael e Fratello são o de arquitetos versáteis. Coordenam um estúdio independente com foco em projetos para impressão 3D e conduz pesquisas acadêmicas voltadas para a prática arquitetônica, destacando-se entre os seus projetos: o tijolo “Cool Brick” (2015), que proporciona resfriamento dos ambientes por

meio da evaporação; o pavilhão “Boom” (2015), que tem como material um composto cimentício leve e que necessita pouca água; o projeto “GCODE.Clay” (2016), propositadamente programa erros no arquivo computacional que coordena os movimentos da impressora 3D, visando à imprevisibilidade; e o “Saltygloo” (2013), um experimento com o uso de sal como principal material.



Figura 79 - Esquerda para direita: "Cool Brick", "Bloom", GCODE.Clay" e "Saltygloo" (RAEL; FRATELLO, 2015)

Outros exemplos do uso da tecnologia por arquitetos aparentam não possuir um caráter exploratório totalmente predefinido. Ainda assim, é possível conhecer que resultados podem ser conseguidos com o uso da tecnologia de impressão 3D sob diferentes cenários, ao analisar esses casos marcantes dentro da linha do tempo.

Em 2013, o arquiteto Bryan Allen e a artista Stephanie Smith completaram uma estrutura de 9 metros quadrados, composta de 585 componentes individuais, impressos em plástico biodegradável por impressoras 3D desktop convencionais. Sete impressoras ao longo de dois meses somaram juntas 10.800 horas de impressão, e a montagem dos componentes no local levou quatro dias. A forma resultou dos requisitos estruturais da construção com plástico biodegradável e que o padrão usado baseou-se em um estudo a respeito das células de árvores sequoias (FAIRS, 2013).



Figura 80 - Pavilhão Echoviren (ALLEN; SMITH, 2013)

Utilizando impressoras 3D semelhantes às usadas por Allen e Smith, o pesquisador Lei Yu realizou dois pavilhões à frente do Laboratory of Creative Design. Yu defende que os arquitetos, ao usarem impressoras 3D, devem construir algo relativamente grande. O projeto “Vulcan” (2015), que recebeu o título de maior estrutura impressa em 3D do mundo, representa uma pesquisa desenvolvida ao longo de cinco anos. A estrutura possui 8 metros de largura e quase 3 metros de altura, é formada por 1.086 elementos que levaram 30 dias para serem impressos por 20 impressoras, e foi montada por 15 pessoas ao longo de 12 dias.

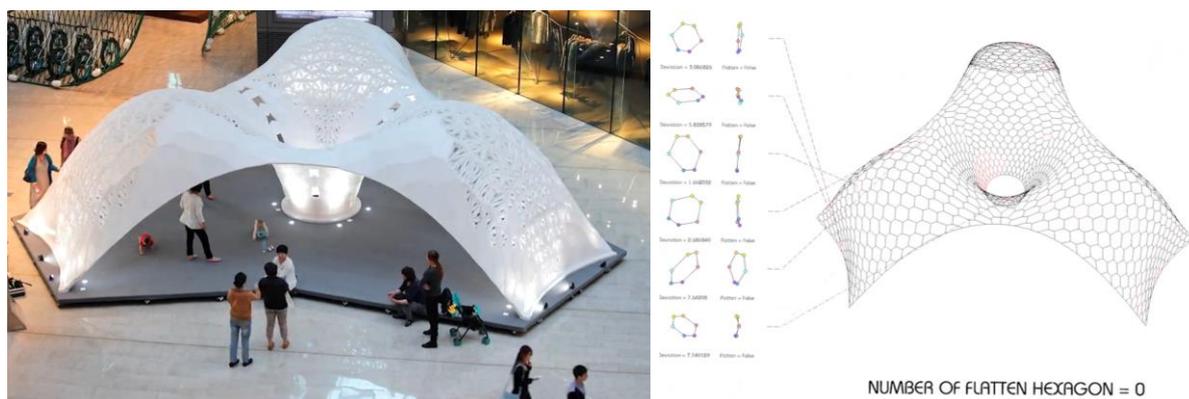


Figura 81 - Pavilhão "Vulcan" na Beijing Design Week 2015 (YU, 2015)

A análise sobre a linha do tempo permite a observação de quais propostas ainda não prosperaram ou não obtiveram continuidade, como o projeto do escritório de arquitetura holandês Universe Architecture que seria realizado junto à empresa D-Shape, e dos projetos que receberam continuidade, como o do escritório também holandês DUS Architects, ambos anunciados em 2013.



Figura 82 - Projeto anunciado em 2013, com construção prevista em 18 meses, não foi iniciado (UNIVERSE ARCHITECTURE, 2013)

O escritório DUS Architects continua trabalhando na execução do projeto apresentado em 2013, tendo 2018 como o ano previsto para a finalização da casa de 700 metros quadrados. Localizada a beira de um canal na cidade de Amsterdam, vem sendo construída no local com duas impressoras 3D de grande porte.



Figura 83 - "Canal House" Render, Janela e impressora 3D. (DUS, 2013)

Além da casa do canal, considerada pelo escritório como um grande laboratório de pesquisa, a equipe do DUS Architects utilizou a tecnologia de impressão 3D em outros dois projetos finalizados em 2016: uma pequena cabana de 8 metros quadrados com soluções criativas para lidar com a insolação e o consumo de materiais; e uma estrutura temporária, construída para receber os encontros dos presidentes do Conselho da União Europeia²⁵ pelo período de seis meses, em uma fachada combinando elementos impressos em 3D com lona tensionada.

²⁵ EU Council

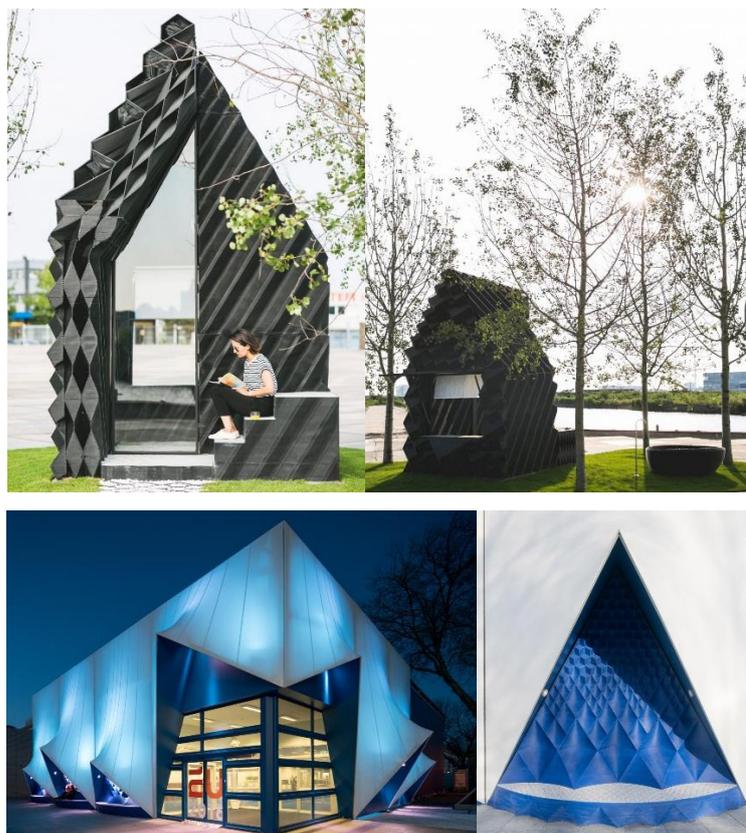


Figura 84 - Acima: Cabine de 8m². Abaixo: EU Council Building. (DUS, 2016)

Em 2014 o método Contour Crafting e a impressão em concreto tiveram um retorno na mídia, com dois projetos: um desenvolvido pela empresa chinesa Win Sun, e outro pelo americano Andrey Rudenko.

Abordando os exemplos de avanços e dificuldades das empresas que tentam superar o desafio da impressão em concreto por métodos de Contour Crafting, que como já foi mencionado, é um método que permite pouca liberdade de formas, a empresa de Andrey Rudenko, Total Kustom é a que até hoje conseguiu o maior controle e aplicação do método Contour Crafting.



Figura 85 - Castelo impresso no jardim de casa (RUDENKO, 2014)

Rudenko iniciou na impressão 3D com um pequeno castelo impresso no próprio jardim e uma impressora desenvolvida por ele. O concreto é um material poluente, produtor de muito CO², mas essa produção pode ser diminuída se a obtenção for local. Ao imprimir seu segundo projeto, um hotel nas Filipinas, Rudenko (2015) realizou testes com o material local, que foi considerado de muito boa qualidade para impressão 3D. Os testes constituíram uma grande parte do tempo de preparo para a construção, levando meses, mas a vantagem foi obtida e a proporção correta da mistura encontrada.

Rudenko menciona que a areia necessária é bem específica, com cinzas vulcânicas difíceis de passar pelo processo de extrusão, mas que obtiveram ótimo resultado, com paredes resistentes e boa adesão entre as camadas.

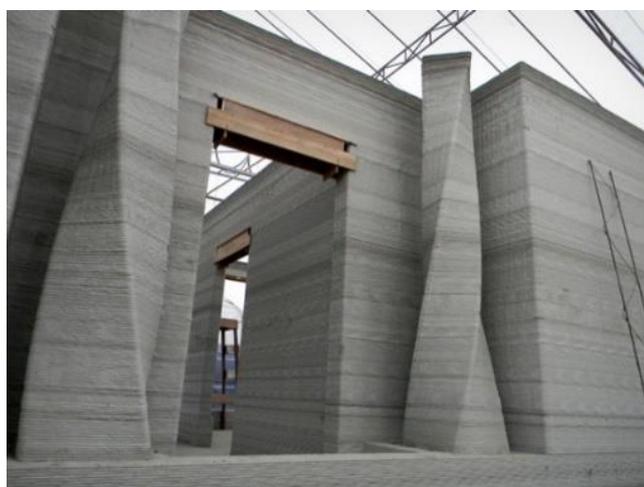


Figura 86 - Detalhes das colunas do hotel (RUDENKO, 2015)

O que levou alguns meses para ter a logística de impressão estruturada agora pode, segundo ele, ser utilizado para imprimir uma casa de tamanho médio em um período de uma semana, utilizando areia de baixo custo, incluindo encanamento e instalações elétricas. Rudenko não especificou a composição utilizada e se os outros compostos do concreto foram igualmente obtidos no local.

Impressão em locais com diferentes temperaturas oferece um desafio a ser vencido aos poucos pela tecnologia, Rudenko (2015) relatou que a construção do hotel nas Filipinas foi facilitada pela estabilidade do clima ao longo do ano.

Os objetos impressos, em máquinas dedicadas a grandes escalas como a D-shape ou o método countour crafting, produzem objetos em concreto, o que implica grande peso ao objeto. Atualmente o modo como as camadas são aglomeradas e sobrepostas torna necessária a obtenção de objetos espessos, que possam suportar suas próprias cargas.



Figura 87 - Paredes robustas impressas pela empresa chinesa Winsun em ambiente de fabrica e montada no local (WINSUN, 2015)

Caminhando em outra direção, cada vez mais a construção civil busca empregar materiais leves. Os benefícios dessa prática ocorrem em diversos níveis e podem ser cumulativos. O uso de materiais leves reduz a carga na estrutura, levando a redução de material, economia e facilidade de execução e transporte.

O uso do concreto de baixa densidade e do concreto com densidades variadas ao longo do objeto impresso pode apresentar parte da solução, mas não são obtidos o mesmo acabamento, textura, durabilidade, resistência e apelo visual que se encontram nos materiais de ponta hoje utilizados. Também não se iguala em espessura e peso às chapas metálicas e outros revestimentos amplamente usados como envelope de edifícios por exemplo. Tem-se aqui um claro panorama de que o *contour crafting* pode apenas substituir a execução de alvenarias e o uso do próprio concreto, porém é o sendo suficiente para a realização de formas mais complexas do que as alcançadas com outros métodos.

No meio acadêmico, o maior número de experimentos com métodos de impressão em concreto vem sendo realizado pela Universidade Técnica de Eindhoven, na Holanda, foi a qual trouxe mais avanços práticos recentemente no campo da impressão 3D com concreto. Para tanto, otimizou e realizou ensaios com diferentes padrões no preenchimento interno das estruturas, nos comandos dos movimentos da impressora (*printing paths*), otimizando o tempo de impressão e o consumo de material, resistência da impressão e aplicação de reforços em aço para

obtenção de resistência mecânica sob efeito de tensão, já que o concreto sem armação em aço resiste bem apenas a esforço de compressão (VAN DER ZEE, 2017).



Figura 88 - Impressão em concreto reforçado de ponte para ciclistas pela Universidade Técnica de Eindhoven (TUE, 2016)

Em 2012, Norman Hack, pelo ETH Zurich, propôs a utilização de braços robóticos para a extrusão livre de material plástico sem a necessidade de suportes temporários. No projeto chamado Mesh-Mould, a ideia foi imprimir estruturas em látice para posterior uso como uma “forma aberta” para deposição de concreto (GRAMAZIO; KOHLER, 2013).

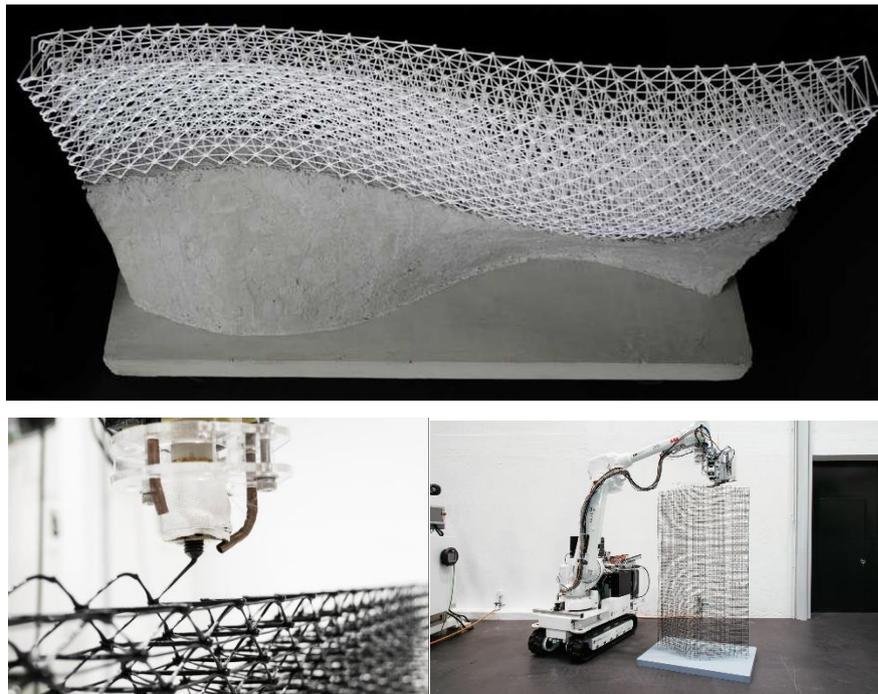


Figura 89 - Mesh-Mould (HACK, 2012)

A técnica iniciada por Hack passou a ser a utilizada pela empresa americana Branch em uma série de projetos. Nos projetos da Branch, a estrutura em látice é mantida aparente, e se difere da proposta de Hack por não servir de molde.



Figura 90 - Design Miami Exhibition Pavilion (SHOP ARCHITECTS, 2016)

A maior estrutura impressa com essa estratégia pela Branch foi o pavilhão projetado pelo escritório SHoP Architects para o evento Design Miami Exhibition. O projeto utilizou uma tecnologia desenvolvida pelo Oak Ridge National Laboratory para imprimir com uma composição biodegradável que conta com uma porcentagem de bambu.

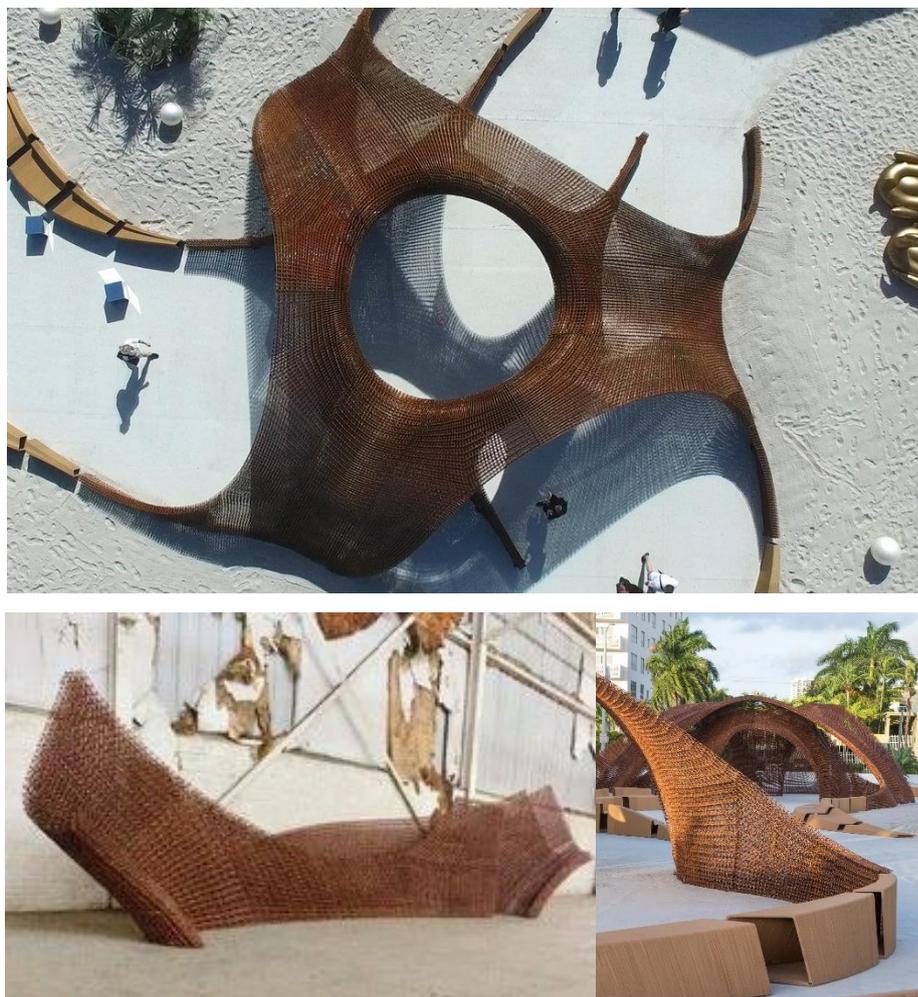


Figura 91 - Design Miami Exhibition Pavilion (SHOP ARCHITECTS, 2016)

O pavilhão é composto por nove peças. Após o evento, reinstalado em uma outra localização e funciona hoje como centro de um mercado semanal de produtos orgânicos. Além da estrutura vazada em látice, o pavilhão possui também superfícies sólidas que servem como bancos (BRANCH, 2016).

Em um projeto colaborativo da Branch com o professor Keith Kasemen e a UTK School of Architecture, foi desenvolvido um projeto de uma base de pouso para drones. Impresso em duas partes com total de 4 metros de altura, o projeto serve de suporte de integração para os demais componentes. Como material, foi usado plástico ABS reforçado com fibra de vidro e posteriormente pintado com tinta automotiva.

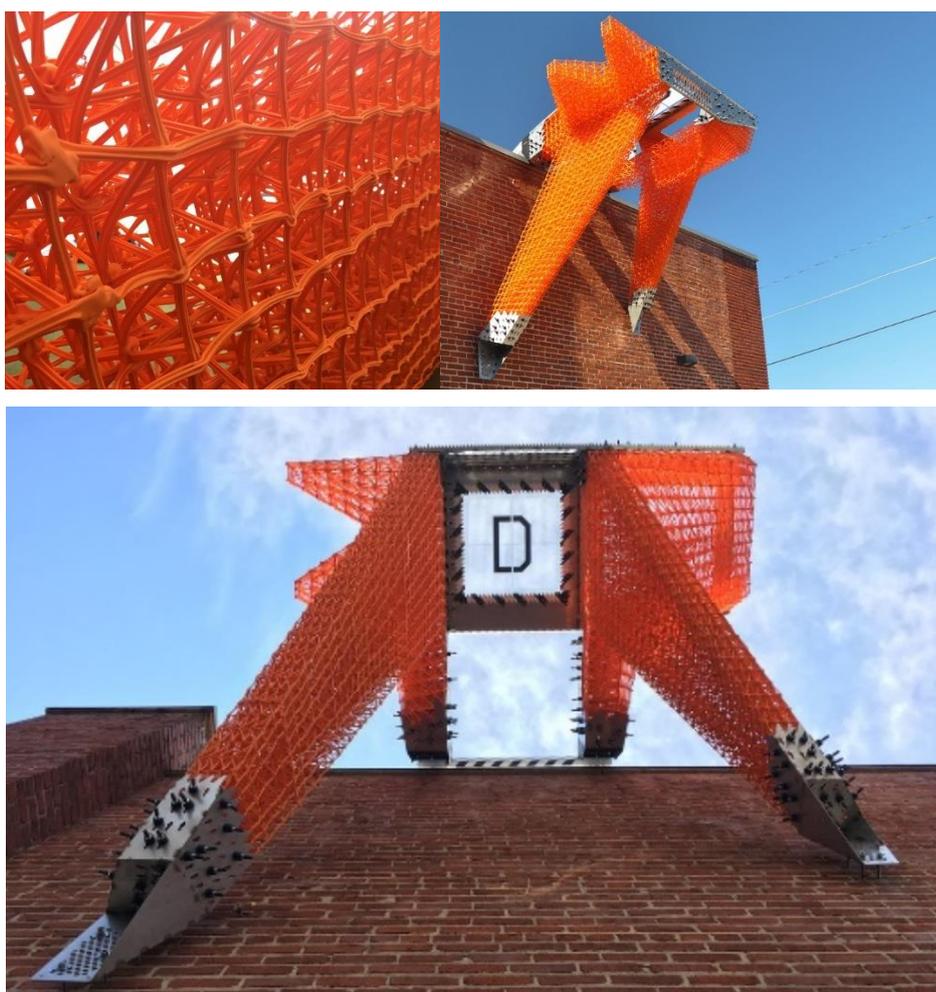


Figura 92 - Drone Landing Pad, Tennessee (KASEMEN, 2016)

O braço robótico consolida-se como equipamento indispensável dentro da fabricação aditiva no contexto da AEC. Ele é utilizado no projeto levado à frente pela empresa MX3D para imprimir uma ponte sobre um canal na cidade de Amsterdam. O projeto foi lançado em 2015 e tem o aval da prefeitura de Amsterdam para ser instalado como estrutura definitiva na cidade.

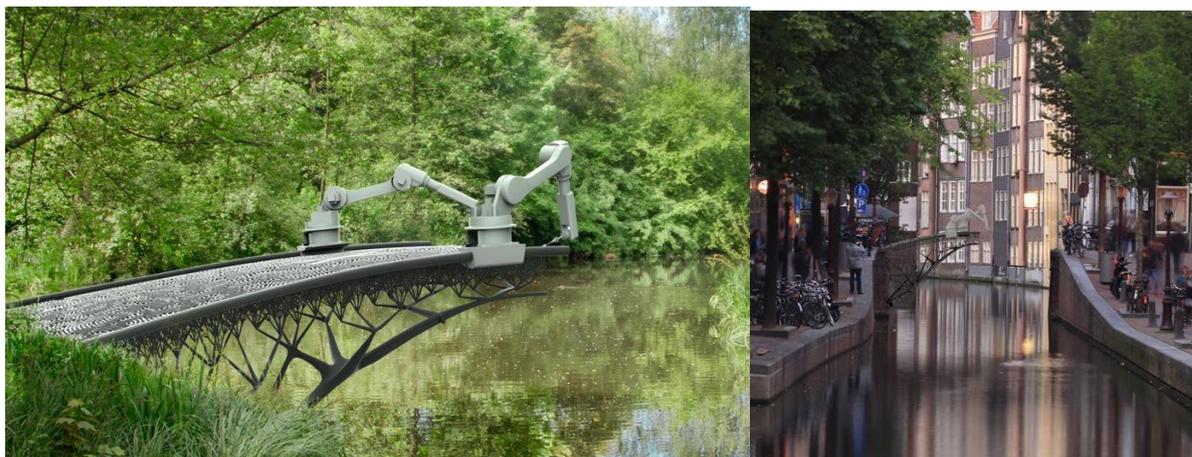


Figura 93 - Imagem da proposta inicial para a ponte sobre o canal de Amsterdam, (DUS, 2015)

Desenvolvido em colaboração com grandes nomes no setor, é o projeto mais ambicioso, contando com um grande número de envolvidos. Colaboram no projeto as empresas como Autodesk como responsável pelo software, ArcelorMittal como responsável pelo fornecimento de aço, Lenovo, ABB como especialista de robótica, ARUP e Air Liquide como especialista em solda. Além das empresas, colaboram no projeto os institutos The Alan Turing Institute e o Amsterdam Institute for Advanced Metropolitan Solutions. O principal responsável pelo projeto arquitetônico é Joris Laarman.



Figura 94 - Envolvidos com o projeto desenvolvido pela MX3D (MX3D, 2017)

O projeto inicial da ponte a ser fabricada pelo método de solda robótica passou por modificações projetuais após a ARUP ingressar no empreendimento como responsável pela engenharia estrutural. O novo projeto entregue por Joris Laarman e ARUP em fevereiro de 2017 tem data de entrega prevista para junho de 2018.





Figura 95 - a) novo projeto (Acima) b) 30% da impressão concluída (Centro) c) cronograma (Abaixo) (MX3D, 2017)

No conceito original, o projeto seria impresso no local. Hoje a ponte está sendo impressa em um galpão onde o ambiente controlado permite a adoção de medidas de segurança. Nesse local, a MX3D desenvolve outros projetos de impressão com solda em menor escala, que proporcionam também a implementação da realização da ponte sobre o canal, atualmente o principal foco.

2.6 Conclusões do Capítulo

A impressão 3D e o conceito de manufatura aditiva começaram a ser explorados por arquitetos, com finalidade prática em escala real, somente a partir de 2009. Dentro do domínio da fabricação digital e da automação da construção, é a mais recente implementação assimilada no campo. O conceito da impressora 3D, conforme total automação ou como base fundamental de uma total automação, como proposto por Khoshnevis, é relativamente novo comparando a outras tecnologias CAD-CAM, cuja aplicação, uso, custo e eficiência são realidades na prática internacional, como a dobra do metal que ocorre há mais de 20 anos, o corte a laser e o uso de fresa e as fabricações subtrativas e extrusões de perfis em geral.

O uso da impressão 3D pela Arquitetura e Construção ainda está em fase de testes, pesquisas, aprimoramento tecnológico, adequação a normas e tem sua implementação prática testada frente a sua viabilidade econômica.

A fabricação aditiva, no entanto, não necessita do conceito de uma impressora 3D como base de toda automação na construção, e pode ganhar força

quando associada a outros equipamentos de fabricação digital já inseridos no mercado.

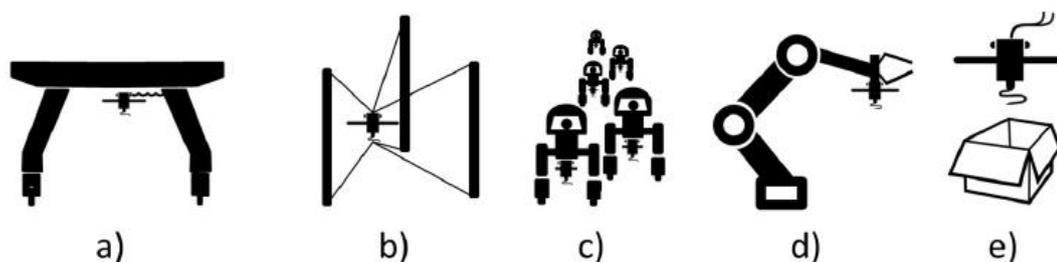


Figura 96 - Diferentes soluções de 3DP a) Grua, b) suspenso em cabo c) *Swarm* d) robótico e) combinado com processo de dobra (LABONNOTE, 2017)

O uso da impressão 3D, associado a um braço robótico expande as possibilidades da manufatura aditiva, tanto considerando o aumento da escala em que é possível construir, quanto o grau de liberdade de movimento dos bicos de impressão. Essa é uma vantagem que foi possível em muitas instituições que já possuíam o braço robótico em seus laboratórios. Hoje o setor da arquitetura e construção é o que mais faz uso da inclusão de braços robóticos no campo da fabricação aditiva.

Por se tratar de um conceito que basicamente opera na maioria dos casos com a extrusão de material, a manufatura aditiva pode ser adaptada a outros equipamentos. Para libertar a construção com manufatura aditiva do conceito de que a impressora deve ser maior que o edifício impresso, alguns conceitos foram idealizados.

Entre esses conceitos estão: *Mini Builders* desenvolvidos no IAAC, o uso do braço mecânico, e a ideia pouco prática de utilizar drones como equipamentos auxiliares na impressão 3D.



Figura 97 - *Mini Builders* (IAAC, 2013)

Em alguns casos, o uso desses equipamentos ainda se encontra fora da realidade e necessita considerável avanço para o salto entre o conceito e o uso prático, como é o caso do uso do *drone*, cuja proposta ainda é frágil e infundada, pois não foram sequer apresentados dados mais detalhados, e investigação do uso, que tem como barreira principal o transporte do material para o alto e a estabilidade do drone.

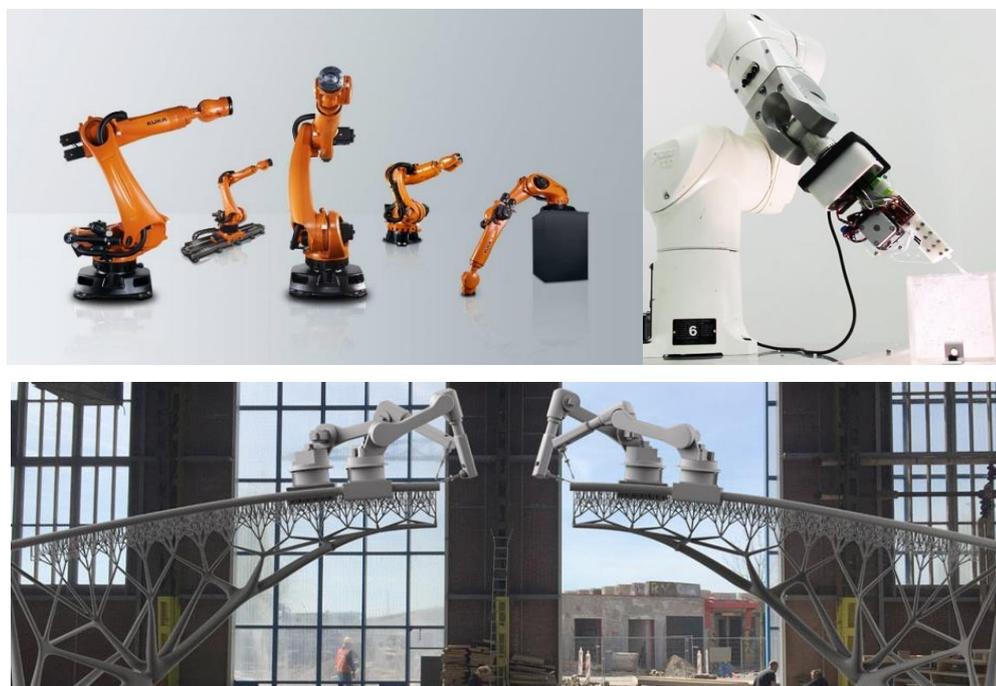


Figura 98 - Braços robóticos associados a métodos de manufatura aditiva (SILVA, 2016)

É comum que o arquiteto, entusiasta da manufatura aditiva, idealize novos meios de usar a tecnologia. Joris Laarman e outros, como Neri Oxman, já propuseram a combinação dos braços robóticos de 6 eixos para expandir as possibilidades construtivas e arquitetônicas da fabricação digital.

Os conceitos acerca da impressão 3D ainda estão em constante movimento, há indefinição quanto à associação dos métodos de impressão, e os modos de fabricação que prometem vantagens mais promissoras ainda não foram desenvolvidos de modo a atender às exigências de tempo, economia e qualidade de uma indústria cada vez mais rigorosa como a da Arquitetura e construção.

A evolução da Manufatura aditiva na arquitetura não pode ser medida individualmente pela capacidade dos seus equipamentos, muito menos pelos projetos até então realizados. Dever ser levado em consideração que requisitos arquitetônicos podem ser conseguidos através desses exemplos, uma vez que, ainda que venham

tornando-se comum casos de impressão na escala real, a maioria das vezes é aplicada para projetos temporários e de exposições.

Os pavilhões e as exposições de arquitetura têm a função de servir como laboratório de teste. A aplicação de seus conceitos, no entanto, na maior parte do tempo, não passa para o cotidiano da prática arquitetônica.

Essa é uma realidade tanto para a manufatura aditiva quanto para outros métodos de fabricação, linguagem arquitetônica, estilo, filosofia e uso. O que não deve ser feito por conta desse distanciamento da prática cotidiana é considerar essas tentativas de quebra de paradigmas como simples devaneios utópicos. O valor das pesquisas está na possibilidade de implementação e melhoramento da prática e da tecnologia, abrindo caminho para as próximas investigações.

Capítulo 03: Os dez princípios da impressão 3D aplicados à arquitetura

O terceiro capítulo possui a finalidade de formar uma visão crítica, pela análise teórica dos dez princípios da impressão 3D, colocados por Melba Kurman e Hod Lipson, investigados sob a ótica de sua aplicabilidade na arquitetura. O capítulo exemplifica onde cada princípio pode ser, ou foi aplicado, confrontando a genuinidade e a efetividade de cada princípio, e com que propósito cada um deles pode ser motor de novos paradigmas arquitetônicos.



Figura 99 - Os 10 princípios da impressão 3D (SILVA, 2016)

Levando-se em consideração as dificuldades de transição da manufatura aditiva para a escala arquitetônica, e similarmente as dificuldades na transição do modelo de protótipo para o de objeto final, este capítulo pretende encontrar indícios de como as dificuldades mencionadas refletem o estado da arte da tecnologia impressão 3D.

3.1 Princípios da impressão 3D

Diante da ideia de que é possível projetar com imensa liberdade, considerando que os dez princípios da impressão 3D, como propostos por Lipson e Kurman, são verdadeiros para a construção de arquitetura na escala do edifício, possivelmente haverá mudanças importantes na forma como os diferentes materiais serão especificados e os edifícios serão concebidos. As análises e críticas aqui realizadas não pretendem ser longas, mas abrir caminhos para discussões sobre a importância desses princípios e suas aplicabilidades à arquitetura.

Os princípios definidos por Lipson e Kurman possuem um ótimo grau de distinção entre eles, o que facilita a análise. Como as possibilidades dentro de cada princípio são grandes, é possível encontrar caminhos para associa-los com o escopo dessa dissertação.

3.1.1 Princípio 1 - Complexidade é grátis

Parte do fato de que peças com o mesmo volume possuem o mesmo preço, alterando-se a complexidade da geometria. Desde que o volume não seja alterado, o custo final não se altera, concluindo-se que, a complexidade geométrica é grátis. Em suma, o que define o valor da peça produzida por manufatura aditiva é o volume de material usado para impressão.

Os pontos passíveis de crítica desse fundamento básico da fabricação aditiva é de que ele pressupõe a ausência de tratamento pós-produção, como polimento, retirada de suportes, aplicação de selantes, e outros processos que podem ser necessários, a depender do método de impressão. Isso pode vir a ocasionar reflexos no custo final, e são sim variáveis de acordo com a complexidade. Outro ponto é que, a depender do método, a produção do objeto pode exigir a construção de suportes temporários, impactando diretamente o custo.

Outro ponto é que a depender da complexidade do objeto, ele necessitará de maior capacidade estrutural, que está diretamente ligada ao volume de impressão, portanto ao seu custo. De fato, esse é um princípio de grande veracidade, e esses pontos mencionados correspondem a uma variação em muitos casos irrelevante e caem na máxima de que, nesse caso, o volume foi alterado, e os autores afirmam unicamente que o princípio se faz valer quando o volume de impressão não é diferente.

Caso não ocorra a necessidade de pós-tratamento, de fato a associação do custo do objeto unicamente vinculado ao seu volume é uma mudança na lógica de que, quanto maior complexidade, maior o custo, uma lógica nunca antes desassociada, no universo da arquitetura e construção. Lipson e Kurman (2013) sintetizam: “Em uma impressora 3D, a complexidade tem o mesmo preço que a simplicidade, não é necessário maior tempo e prática para fabricar um objeto complexo e ornamentado do que o necessário para fabricar um simples bloco”. (Tradução do autor)²⁶

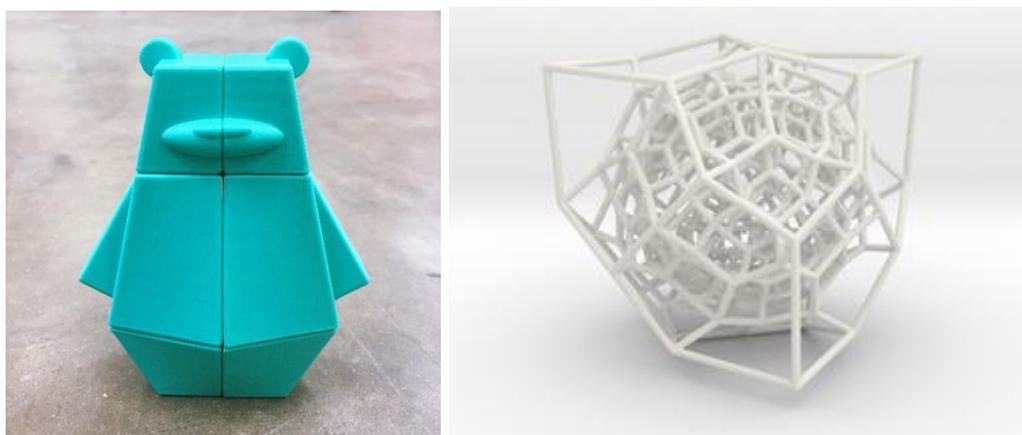


Figura 100 - A complexidade do objeto não influi no custo de execução (THINGVERSE, 2016)

Que possíveis alterações, a quebra da relação custo X complexidade acarreta na arquitetura? Pode ser que modifique a relação diária do arquiteto com os clientes, ao ser frequentemente questionado sobre a necessidade de um determinado elemento, quando a intenção do cliente é a simplificação da construção para diminuir custos. A dissociação dessa relação pode repercutir no potencial criativo dos arquitetos. Como passa a funcionar a programação do processo de projeto do arquiteto? O processo de projeto se altera? Esses são questionamentos que merecem atenção exclusiva, caso desejem ser avaliadas e mensuradas.

O arquiteto Micheal Hansmeyer sugere a possibilidade do retorno à ornamentação nos edifícios, explorando as possibilidades decorrentes do princípio de que a complexidade é grátis, proposto por Lipson e Kurman. A ornamentação desaparece da arquitetura não decorrente necessariamente do custo de execução; no modernismo, ela some por motivo estilístico e de linhas de pensamento.

²⁶ “On a 3D printer, complexity costs the same as simplicity. Fabricating an ornate and complicated shape does not require more time, skill, or cost than printing a simple block.” (LIPSON; KURMAN, 2013)

O retorno da ornamentação proposto por meio da impressão 3D traria uma nova dimensão à ornamentação, vinculada dessa vez não à capacidade técnica do escultor ou artesão envolvido no detalhe de execução, mas à variável de resolução alcançada pelo equipamento utilizado. Hoje essa resolução, inclusive, aproxima-se da capacidade de captação do olho humano.

3.1.2 Princípio 2 - Variedade é grátis

Este princípio pode alterar o modo como é pensada a reprodução da arquitetura. Lipson e Kurman comentam a versatilidade da impressora 3D, ressaltando que, diferente de outras máquinas de fabricação, a impressora 3D não precisa de ajustes de ferramentas para produzir formatos diferentes, nem tampouco há a necessidade de treinamento do operador.

As máquinas subtrativas hoje convencionais estão limitadas a um espectro de formatos, a predefinições e predisposição de ferramentas. Por exemplo, para realizar curvatura em metal ou corte em metal, é necessária troca de ferramentas.

Kolarevic (2005), no entanto, diz que essa relação de custo na produção de peças com infinita variedade também é possível em equipamentos de fabricação digital subtrativa. Segundo ele, a habilidade de construir edifícios de forma livre de modo econômico surgiu exatamente da possibilidade de equipamentos CNC subtrativos produzirem componentes customizados em massa.

Apesar de Lipson e Kurman estarem corretos na definição de que o formato do objeto não torna necessária o uso de outra impressora ou leva a substituir um elemento da impressora, há a fragilidade nesse conceito, se considerado que, na impressão 3D também se faz necessário a adaptação de bicos de impressão, e pode ser imperativa a troca de sistemas de abastecimento de materiais variados. Essa observação, no entanto, não destrói o conceito de que, para um mesmo material e resolução (associada ao tamanho do bico), esse princípio é de aplicabilidade prática coerente.

Se considerar unicamente o mundo da impressão 3D, pouco importa se serão impressos mil objetos iguais ou mil objetos diferentes. Tal como no princípio de complexidade é grátis; o que define o custo mais uma vez é o volume de impressão.

Mas esse princípio pode se tornar meia verdade se comparado com outros métodos de fabricação. Na injeção em molde, tem-se que, a partir de uma

determinada tiragem, o número de peças favorece a economia de escala de produção, influenciando o preço de custo em favor da injeção em molde.

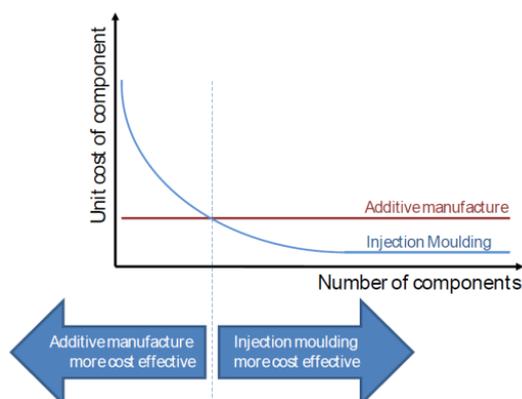


Figura 101 - Gráfico de custo: Injeção plástica vs impressão 3D (LABONNOTE, 2017)

Se feito um comparativo entre a impressão de mil objetos diferentes entre si e a fabricação de 1000 objetos semelhantes ou iguais via outro método, pode haver um ponto no qual a economia de escala venha a favorecer os objetos iguais, tal como no gráfico acima e um objeto gráfico pode ser comparado também a outros modelos de fabricação para construção.

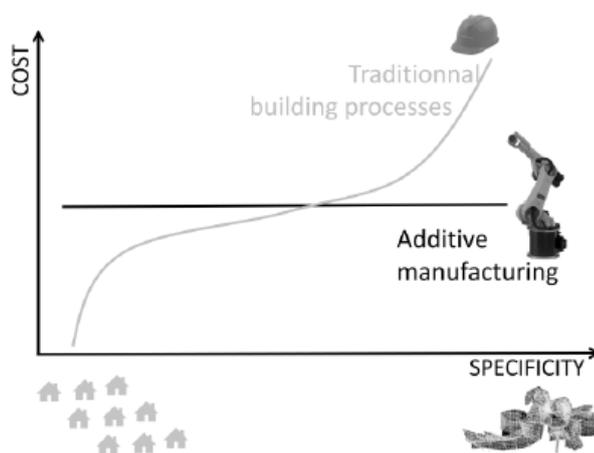


Figura 102 - Vantagem relativa da impressão 3D sobre a construção tradicional (LABONNOTE, 2017)

Esse conceito, no entanto, é um modo de levar esse princípio ao seu limite, e as vantagens de se possuir variedade grátis, mesmo considerando apenas o universo da fabricação aditiva, é ilimitadamente mais vantajoso.

Uma das possibilidades mais veiculadas é pensar a construção para população de baixa renda e habitação de interesse social, que, por quase todas as vezes, precisam submeter-se às desvantagens da construção em massa e em larga escala, uma padronização que, de tão uniforme, acaba com o sentimento de identidade, tão importante quando tratamos de habitação.

O arquiteto chileno Aravena atacou essa fragilidade das concepções das habitações de interesse social com a possibilidade de customização de suas residências, através de uma mudança política que envolve a autoconstrução. Deste modo, as vantagens atingem também a sensação de participação nas decisões por parte da população envolvida. O princípio da variedade é grátis pode ir na mesma direção da proposta de Aravena quanto à customização, tendo um fator importante que é o potencial de incorporar a residências o princípio da personalização.



Figura 103 - Proposta de Aravena com possibilidade de personalização por autoconstrução (ARAVENA, 2016)

Imagine a possibilidade de customização de residências através de softwares. Aliados à manufatura aditiva, será possível mudar completamente o cenário da construção de interesse social bem como o de assistência às vítimas de desastres naturais. Apesar da possibilidade de aplicação dessa tecnologia com essa finalidade social, Labonnote (2017) diz que apenas 3% das pesquisas voltadas para oportunidades no mercado de impressão 3D na AEC são voltados para habitação de baixo custo.

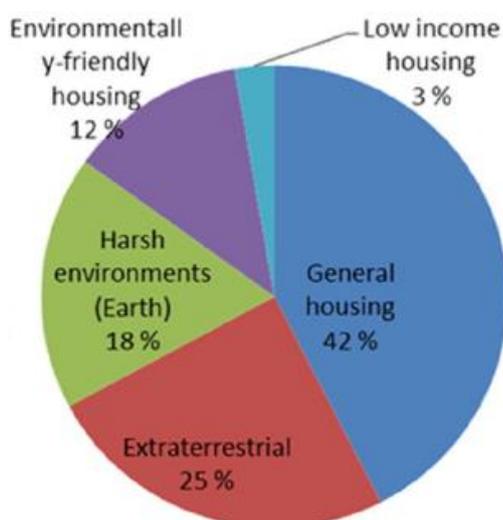


Figura 104 - Mercados relevantes na fabricação aditiva para AEC (LABONNOTE, 2017)

Para ser aplicado o princípio da variedade construtiva grátis, haveria a necessidade de que os variados projetos também fossem grátis para suprir o incrível número de demanda projetual nessas habitações. A variedade construtiva é grátis, mas os custos projetuais para essa demanda de personalização certamente ocasionariam um impedimento a essa ideia, podendo preencher essa lacuna os softwares que possibilitam projetos generativos.

3.1.3 Princípio 3 - Não necessita de montagem

A linha de montagem é o estágio final e um dos processos fundamentais da produção em massa. A capacidade, na indústria moderna, de cada máquina produzir apenas peças idênticas que posteriormente são montadas por robôs ou contingente humano, constrói a relação de que, quanto mais peças um produto contém, mais longa e dispendiosa será a linha de montagem.

Lipson e Kurman (2013) defendem que, por imprimir por camadas, a impressora 3D pode produzir objetos com partes interligadas sem a necessidade de montagem.



Figura 105 - Objetos articulados impressos sem necessidade de montagem (THINGVERSE, 2015)

Esse método é certamente muito vantajoso e inerente em um novo raciocínio de imaginar juntas e conexões móveis entre os componentes. Já é usual ver objetos com essa proposta em plataformas online de serviços de impressão e de venda de objetos produzidos por manufatura aditiva. Em um desses serviços são inclusive sugeridas soluções e dimensões de vazios entre as diferentes peças, que variam dependendo do material escolhido. A ilustração evidencia também a possibilidade de peças interseccionadas.

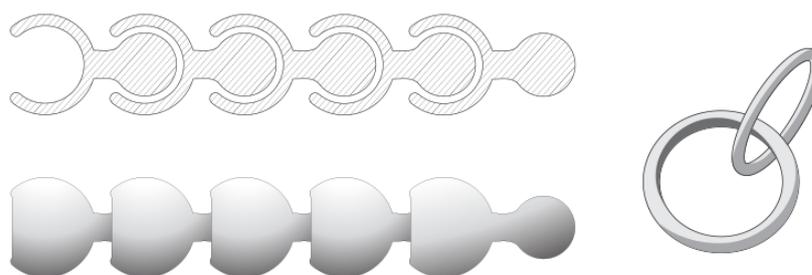


Figura 106 - Sugestão para impressão de peças interligadas (MATERIALISE, 2017)

As possibilidades a surgir desse princípio têm sido exploradas amplamente por designers, no entanto a arquitetura, por motivos desconhecidos que podem ser passíveis de investigação encontra-se fora dessas propostas. Lipson e Kurman utilizam como exemplo desse princípio a possibilidade de imprimir uma porta com maçanetas e fechaduras já acopladas. A atual resolução de impressão e a necessidade de polimento na pós-produção de peças metálicas inviabilizam que essa proposta seja utilizada hoje. Dificilmente uma maçaneta produzida hoje em uma impressora 3D teria a mesma suavidade de movimentação que uma maçaneta como conhecemos. Os valores da produção em escala da maçaneta também tornam a impressão 3D não competitiva na viabilidade econômica. A manutenção dessa maçaneta pode ser dificultada, já que o método atualmente mais avançado na impressão de metal necessita de uma cama de areia, que dificilmente seria removida depois da maçaneta impressa.

Apesar de Lipson e Kurman proporem como exemplo desse princípio um elemento que pode ser considerado um elemento arquitetônico, neste caso a porta, pouco se pode tirar de concreto se pensarmos a maçaneta como a conhecemos. Quando se pensa na impressora 3D como uma forma de disputar com meios de produção específicos a um elemento distinto, que já tem sua cadeia de produção aprimorada e especialmente destinada para esse específico objeto, a impressora como uma máquina de impressão universal entra em nítida desvantagem.



Figura 107 - Objeto com diversas partes impressas já montadas. (LIPSON; KURMAN, 2013)

Observando esta imagem surpreendente de objetos impressos pré-montados digitalmente com grande quantidade de partes, parecem terem sido montados em pós-produção, mas não o foram. Podemos pensar nesse princípio como possível em um futuro próximo, quando a quantidade de elementos de edifício a serem montados diminua consideravelmente.

É evidente que as melhores propostas surgem quando se pensa na impressão 3D e seus potenciais para fabricação de produtos inovadores que tiram proveito da potencialidade do equipamento, e não na competição com objetos iguais aos já existentes. Como vemos no exemplo do objeto a seguir, podemos realizar reflexões e analisar diversas óticas e possibilidades que surgem da discussão em torno desse simples objeto, uma maçaneta possível apenas por ter sido pensada para fabricação por impressora 3D. Por exemplo: a geometria usada em um único componente substitui o uso de múltiplos componentes; o material passa a ser um meio de programação.

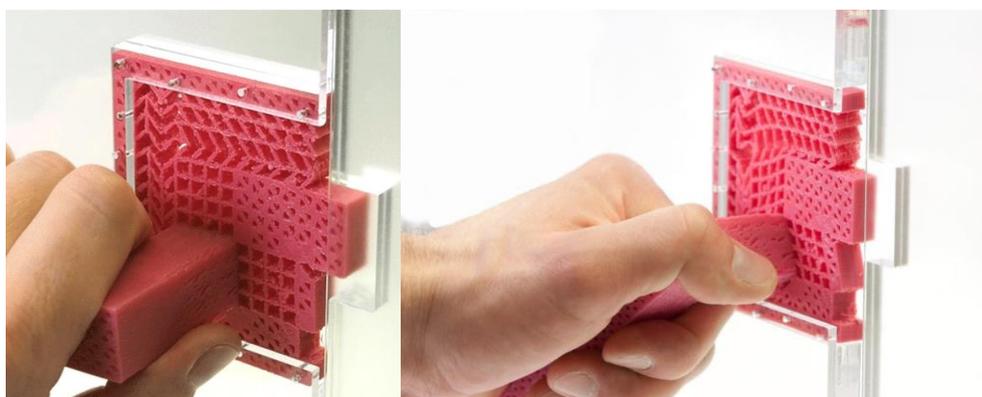


Figura 108 - Objeto se movimenta mesmo sendo constituído de uma única parte (HASSO PLATTNER INSTITUTE, 2016)

A montagem é feita no modelo virtual. Nesse contexto, tornou-se óbvio que a manufatura aditiva pode levar a engenharia a um novo nível. Para essa nova abordagem de concepção, o termo “*Funktionales Konstruieren*” (construção funcional) foi usado por Straus (2013), segundo o qual não precisamos mais conceber construções com peças padrão existentes, mas podemos materializar digitalmente o seu desempenho. Isso ganhará importância na tecnologia de fachadas, na construção e finalmente na arquitetura (STRAUS, 2013).

Na arquitetura temos que, mesmo para as novas propostas de adaptações do método Contour Crafting, que visam ser implantadas na escala comercial, podendo preencher essa lacuna, ainda é preciso parar o funcionamento da impressora várias

vezes para que reforços em aço sejam incorporados ao concreto, já que o concreto puro não é resistente a forças de tensão. Essas dificuldades ainda limitam bastante a implementação desse princípio na escala arquitetônica.

3.1.4 Princípio 4 - Tempo de entrega é zero

Esse princípio possui amplos impactos, incluindo grandes vantagens para o meio ambiente e possíveis mudanças no comportamento social quanto ao consumo. Sabendo que a construção civil é responsável por 50% da produção de CO², a arquitetura, tendo grande responsabilidade dentro desse cenário - na especificação de matérias e na eficiência energética do edifício – relaciona-se e favorece a humanidade e o ecossistema com esse princípio da manufatura aditiva, que possui como principal resultado a redução de gasto energético no transporte. Para tanto, é preciso conhecer as limitações e as possibilidades desse princípio. Lipson e Kurman apontam a capacidade de impressão sob demanda, ou seja, a impressão de um objeto de imediato, apenas quando preciso, reduz a necessidade de estocagem em companhias. Por exemplo, é possível que uma empresa aeronáutica, ao necessitar de uma peça específica que não possui em estoque, imprima-a no local, tornando desnecessários a encomenda e os custos e gastos ambientais envolvidos nesse processo. Nesse cenário, um navio em trânsito pode imprimir uma peça danificada durante a viagem, repor e seguir o seu trajeto, sem que seja necessário manter estoque.

A arquitetura pode usufruir desse benefício. O escritório DUS Architects possui, no projeto para a Casa do Canal, em Amsterdam, uma impressora no local de construção. Nesse caso, a função da impressora é produzir as peças no local, com a vantagem de por exemplo, se uma das peças for danificada, o tempo e o custo de transporte ao solicitar-se a peça em um local distante acarretariam atrasos e despesas extras. Além disso, o transporte do material em estado bruto é muito mais facilmente deslocado do que o transporte de peças prontas, que demandam logísticas de embalamento, envolvem o risco de quebra e ocupam mais espaço que o material compactado.

O apoio a vítimas de catástrofes naturais é tema recorrente ao se pensar sobre os potenciais da impressão 3D. O princípio de “tempo de entrega é zero” é o maior vinculador dessa discussão. Muito se fala sobre a possibilidade de usar a impressora 3D para ajudar vítimas a reconstruírem hospitais e casas rapidamente,

mas Tim Minshall aponta que a vantagem está justamente em conseguir produzir objetos cuja demanda é imprevisível, como por exemplo uma peça hidráulica para substituir um cano estourado que pode estar impossibilitando o transporte de água encanada para toda a região.



Figura 109 – Interface do aplicativo para customização de peças hidráulicas sob demanda para conectar tubos de diferentes diâmetros (FIELD READY, 2015)

Um dos fundadores da organização de ajuda humanitária em zonas de desastres “Field Ready”, Ashley Dara Dotz ressalta a intenção da organização, que utiliza impressoras 3D para produzir equipamentos médicos sob demanda, como um simples parafuso que pode ser tudo que falta para um equipamento funcionar corretamente. Dara (2015) diz que uma impressora 3D, em casos como esses, pode servir como um catálogo infinito de todo suprimento de equipamento médico necessário fabricáveis instantaneamente sob demanda e customizáveis. Os materiais podem ser reciclados e produzidos com ABS disponível no local.

Projetos com lógicas parecidas já foram realizados na arquitetura, como o TrussFab que utiliza pequenas conexões para a fabricação de grandes estruturas com garrafas pet de diversos formatos (Kovacs, 2017).

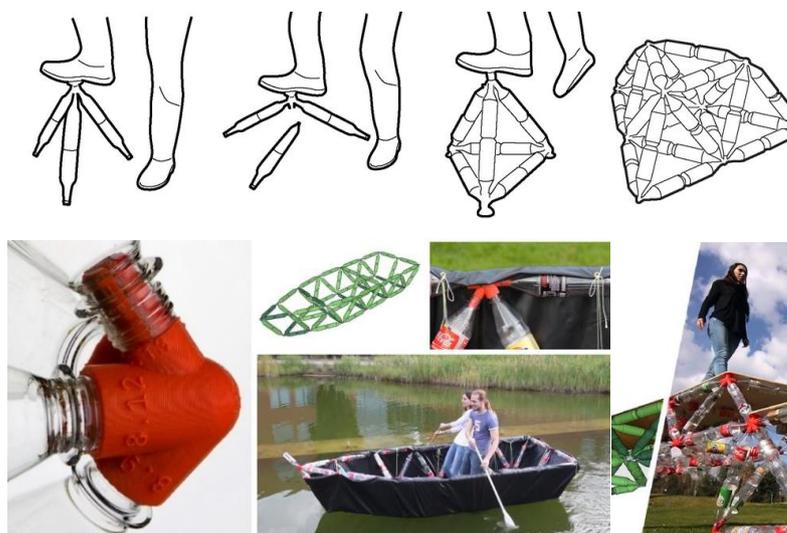


Figura 110 - Truss Fab (KOVACS, 2017)

Treinando a comunidade local é possível que os doadores circulem o dinheiro na própria comunidade afetada. Os objetos produzidos no local, reciclados um após o outro, possuem um custo menor que os vindos de fora. É economicamente mais viável aos doadores de ajuda financeira contratar a comunidade local para produção dos objetos. Enviar peças únicas a lugares remotos é custoso e leva tempo. Capacitar pessoas no local é um modelo muito mais eficiente para que a população supere mais rápido, uma forças e aumente sua resiliência.



Figura 111 - Objetos sendo impressos em um equipamento portátil ligado na bateria de um veículo, (FIELD READY, 2015)

Outro projeto de aplicação de impressoras 3D doméstica para a realização de estruturas arquitetônicas com elementos de conexão que podem ser usados como referência para a aplicação no cenário de construção emergencial é a estrutura comissionada ao SOFTlab pela empresa 3M. A estrutura modular foi feita a partir de tubos de alumínio conectados por mais de 1200 conexões impressas.

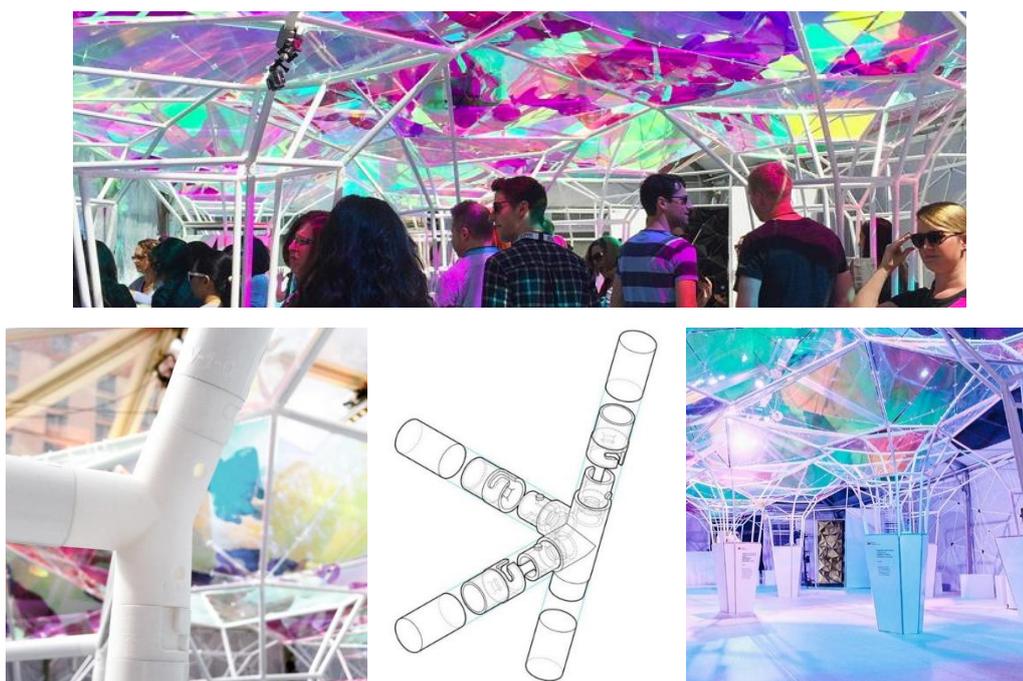


Figura 112 - Pavilhao 3M, New York (SOFTLAB, 2015)

O salto exponencial nesse princípio é a união da produção e do consumo em um mesmo local. O que ocorre hoje é que muito se produz em locais onde a mão

de obra é barata. Muitas vezes o local onde o material é disponível não corresponde àquele cujo a mão de obra é mais barata, sendo claro o gasto de energia necessário ao transporte da matéria-prima para onde ela será processada, transformada em produto e retornada muitas vezes ao próprio país de origem da matéria-prima. Ou seja, se a impressora 3D for usada em um local distante da obtenção do material, há “uma viagem” de economia de combustível, se o material for retirado do local onde foi impresso, ou seja, o produto construído com matéria-prima local, acarreta a economia de “duas viagens”.

Imagina-se este cenário: o material sai do Brasil, é produzido na China e volta para o Brasil. Houve duas viagens de economia: uma no transporte do material e outra no transporte do produto.

Imagina-se um outro cenário: o material é obtido na China, e enviado ao Brasil para fabricação. Ainda assim, há economia, pois, o volume do material transportado é menor que o volume do produto transportado.

A economia só é verdadeira se feita com materiais locais. Pensando nisso, é preciso entender que o maior benefício ambiental desse princípio para a arquitetura é a impressão de casas com material local. O projeto proposto pela empresa italiana WASP baseia-se nessa lógica ao propor a construção de casas com argila e palha, até agora, no entanto os desenvolvimentos da proposta vêm enfrentando dificuldades.

Esse princípio, juntamente com o pouco desperdício proveniente do uso da impressão 3D, como veremos no “Princípio 8”, fundamenta as bases da construção 3D de modo ecológico.

O princípio de “zero tempo de entrega”, aliado à construção com material local, é o que está por trás da proposta de construção em outros planetas, em estudos dirigidos pela NASA. Esse princípio é elevado quando realizamos a simulação de economia de energia possível na hipótese de construção em solo lunar com material local: o combustível necessário para levar um tijolo ao espaço é 1000 litros, ou 10.000 dólares. E a possibilidade do artigo escrito junto com a NASA foca principalmente na análise da viabilidade de se construir com o regolito, o mineral em pó presente em abundância em toda superfície a lunar. O regolito é o segundo material com mais publicações acadêmicas a respeito no campo da AEC, ficando atrás apenas do concreto.

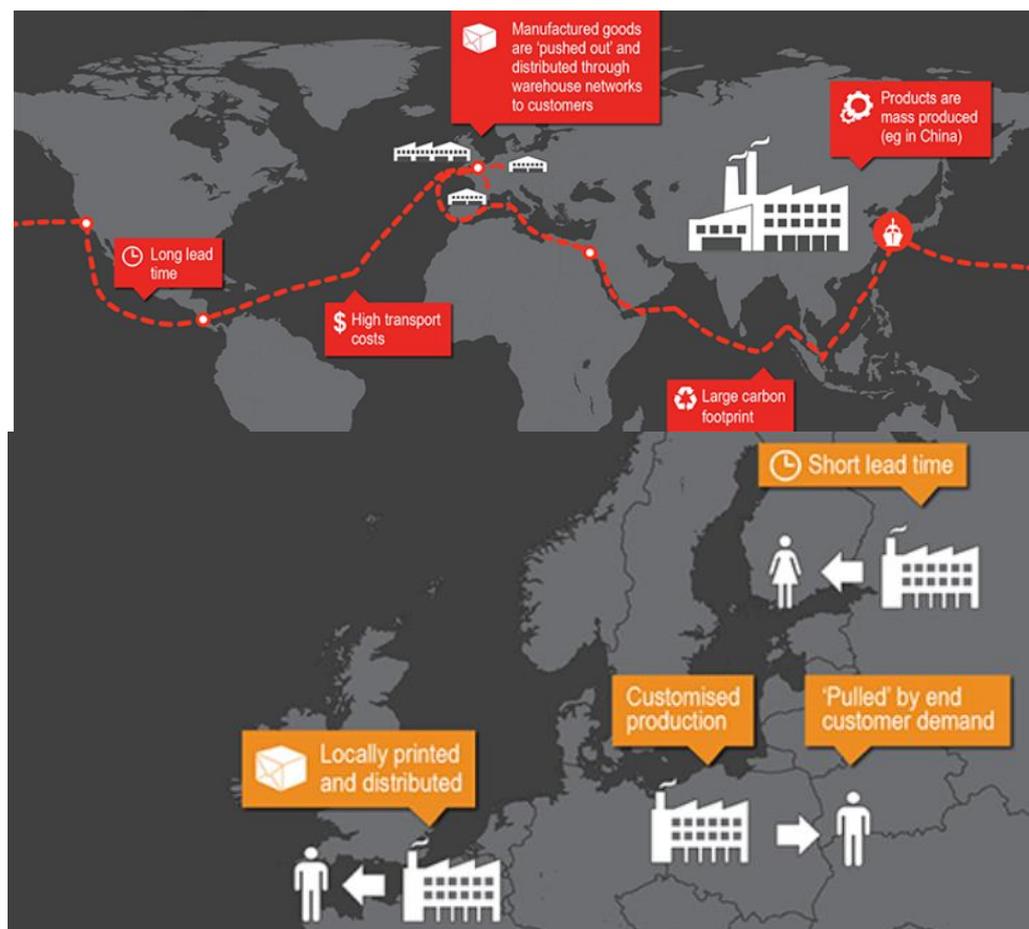


Figura 113 - Infográfico da mudança da cadeia de distribuição (LASALLE, 2013)

Além da economia de recursos, há aí uma mudança fundamental de paradigma na concepção humana do século passado e na concepção humana deste século, de como se produz e como se consome, de como pensamos onde produzimos e onde consumimos.

Não precisar de estoque, custo de envio zero por *download*, tempo de envio zero, rompem um paradigma importante, o que constitui uma das óticas revolucionárias da impressão 3D. O aspecto digital dos arquivos, tende a posicionar a impressora 3D em patamares de revolução digital semelhante aos alcançados pelo MP3 e PDF, na forma como mudaram o modo de acessar música e leitura.

3.1.5 Princípio 5 - Liberdade formal ilimitada

O argumento de Hod Lipson and Melba Kurman (2013) sobre este princípio é de que, com as tecnologias de fabricação tradicionais e com o modo de produção artesanal humano, o repertório de formas conseguidas é finito. Nossa capacidade de formar objetos é nesses casos, limitada pela disponibilidade de nossas ferramentas. Como exemplo, os autores citam a limitação de um torno de madeira tradicional, em

sua capacidade de poder fazer somente objetos arredondados. Continuam criticando, reforçando que uma máquina de fresa somente pode fazer objetos que sejam alcançados com a ferramenta de fresa²⁷ específica. E por fim apontam que uma máquina de moldagem só é capaz de produzir formas que possam ser invertidas na confecção de moldes, e que esse molde possibilite que o material da peça seja nele depositado e em seguida extraído. Uma impressora 3D, segundo os autores, supera esses limites, abrindo novas possibilidades no campo do design, podendo fabricar formas que até agora só foram possíveis na natureza.

A possibilidade de novas formas é sedutora no campo da arquitetura. Ao arquiteto que prioriza a função ou ao arquiteto que busca a estética, a forma é invariavelmente o resultado final de todo o processo de projeto. O aumento do repertório é um modo de facilitar a atuação profissional em rotina, e o desenvolvimento de um repertório próprio é um modo de afirma-se aos olhos dos outros como possuidor de uma identidade. A infinita possibilidade formal citada por Kurman e Lipson possui ressalvas: algumas formas, mesmo facilitadas pela impressão 3D de modo geral, possuem dificuldades específicas relativas a cada diferente método de impressão, devendo cada um deles ser avaliado de modo independente.

Impressoras que usam materiais em pó não podem produzir peças “ocas” pois seria impossível retirar o pó que é usado como suporte no momento da impressão.

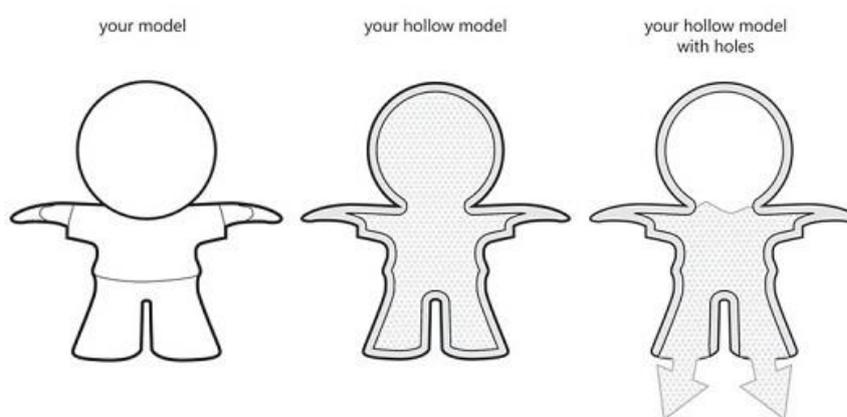


Figura 114 - Uso de elementos abertos para retirada do material poroso após a impressão (MATERIALISE, 2015)

²⁷ **Fresas** são ferramentas de corte rotativas, constituídas por uma série de dentes e gumes, geralmente dispostos simetricamente em torno de um eixo. Os dentes e gumes removem o material de um bloco bruto de forma subtrativa (RELVAS, 2012).

Cada limitação leva o designer a pensar a forma de um modo diferente. Vemos que, na arquitetura, essas limitações e possibilidades são igualmente relevantes. A pesquisadora Emily Whiting utiliza simulações de software para alterar o eixo gravitacional do objeto a ser impresso. Através da inserção de vazios na estrutura interna do objeto, ela consegue controlar seu equilíbrio de um modo que não seria possível com outros métodos de fabricação.



Figura 115 - Objects physics, (EMILY WHITING, 2014)

A adoção do procedimento proposto por Whiting mostra como o princípio da liberdade formal possibilita o alcance de um atributo que vai além da estética e da pura geometria do objeto. O centro de equilíbrio, demonstrado por Whiting, pode ser aplicado na arquitetura para conseguir estruturas em balanço, redução de custo e efeitos visuais incomuns.

3.1.6 Princípio 6 - Necessidade de habilidade técnica para fabricação é nula

O ponto de fundamento deste princípio é o de que a impressora 3D é guiada a partir de um arquivo digital, por isso o conhecimento indispensável do operador de uma impressora 3D pode ser menor que o de outros meios de fabricação.

Por certo, o conjunto de proposições arquitetônicas voltadas para a realização com manufatura aditiva aproveita-se desse processo fabril automatizado. No entanto, mesmo mais automatizado e simples que outros métodos de fabricação digital, o atual modo de aplicabilidade de mecanismos de manufaturas aditivas para fins de construção é de relativa complexidade no que se refere à habilidade de operação do processo construtivo.

Khoshnevis (2004) e Straus (2013) mostram diagrama de relativa complexidade para a utilização da manufatura aditiva pela arquitetura, o que vai no sentido oposto ao que Lipson e Kurman enxergam para esse princípio

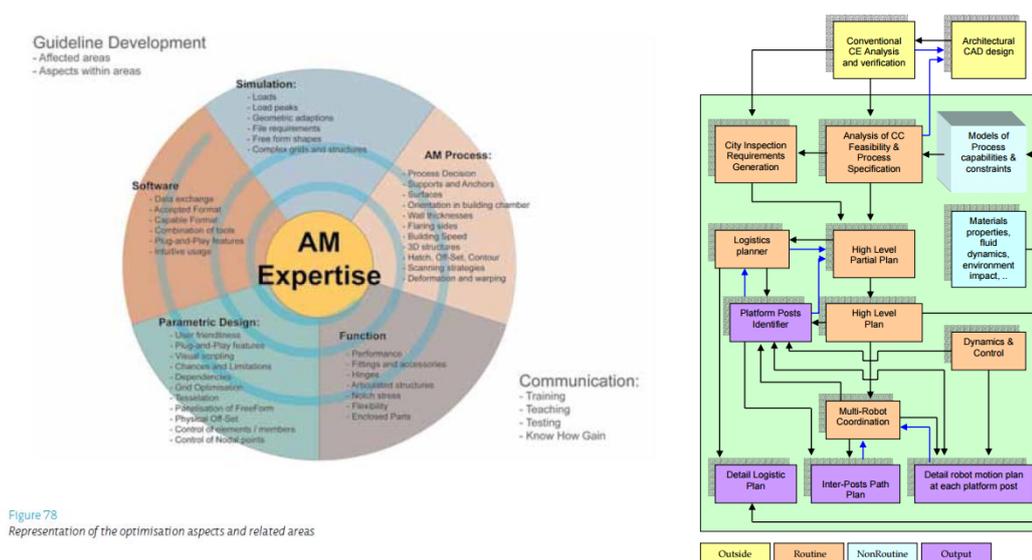


Figura 116 - Diagramas complexos para o uso da manufatura aditiva na escala do edifício (STRAUS, 2013)

Sabe-se que pode haver em alguns casos grande necessidade técnica na execução, como vemos relatado por Gardiner (2011). No meio acontecem diversos impasses e contratempos, como vemos também na casa do canal do DUS e em escalas variadas em todos os projetos.

Há outros casos em que as dificuldades não são tão grandes. É preciso um olhar mais específico para cada caso, como veremos no próximo capítulo.

Esse é mais uma limitação temporal já que, com o passar do tempo os softwares tendem a automatizar e validar com mais precisão. Como já mostrado por Gardiner, o uso de software pode solucionar grande parte dos problemas que se pensam estar associados aos equipamentos de impressão.

Mesmo com algumas limitações, ao comparar a fabricação de objetos de iguais complexidades em uma máquina de molde injetável e em uma impressora 3D, a impressora é muito acessível ao operador inexperiente. O mesmo é também verdade para a comparação de uma construção com impressora 3D e uma construção tradicional.

No entanto, a calibragem e ajustes citados por Lipson como exclusividade dos métodos tradicionais de fabricação também são necessários no estágio da impressão 3D hoje.

Fundamentados no modo como artesãos tradicionais progridem ano após ano na evolução das habilidades necessárias na confecção de um objeto, Lipson e Kurman indicam que as habilidades indispensáveis ao operador de uma impressora

3D são menores que aquelas de outros meios de fabricação, fato que, segundo os autores, possibilita que esse princípio da fabricação 3D guie novos modelos de negócios e transfira novos modos de produção para as pessoas em ambientes remotos ou circunstâncias extremas, o que certamente pode incutir nesses avanços extendendo-se no campo da arquitetura e construção.

3.1.7 Princípio 7 - Compacta e portátil

O pouco volume de espaço necessário para a produção com uma impressora 3D é a vantagem citada por Lipson neste princípio. Quando comparada a uma máquina de fabricação tradicional, a impressora 3D possui maior capacidade de ser transportada e instalada. Como exemplo, uma máquina de moldagem por injeção só pode fazer objetos significativamente menores do que ela própria. O oposto acontece na impressora 3D, podendo fabricar objetos qual seja a dimensão do seu leito de impressão. Se for disposta de modo que seu aparelho de impressão possa mover-se livremente, uma impressora 3D pode fabricar objetos maiores do que ela própria.

Relacionando diretamente com a prática da impressão 3D na arquitetura e construção, esse princípio é de fundamental análise. Os primeiros conceitos da aplicação da manufatura aditiva à arquitetura e construção pensavam na adoção da tecnologia ao setor como um escalonamento dos equipamentos a ponto de serem suficientemente grandes para imprimir o edifício. Isso é presente na proposta de Khoshnevis e verificado também no conceito da D-Shape, win-sun, Wasp e outras propostas. A vantagem nesse caso é que a mobilidade do bico de impressão possibilita o seu trajeto por longas dimensões, desde que o abastecimento de material seja eficiente. Assim sendo, mesmo nos casos de máquinas enormes, o espaço necessário para instalação do “canteiro de obras” podendo não ser diferente do espaço de um canteiro convencional.



Figura 117 - Canteiro de uma impressora 3D de concreto (RUDENKO, 2015)

Como medida para possibilitar uma maior escala, sem a necessidade de montagens que envolvam grande logística, começou a ser utilizado o braço robótico que, como vantagem, oferece também mais versatilidade e controle dos movimentos. Surgem como iniciativas que visam dar resposta a esse modo de pensar as limitações de escala na construção com impressão 3D os *Mini Builders*, pequenos robôs com capacidades próprias que, juntos, propõem-se a construir grandes estruturas. Os *Mini Builders* foram propostos pelo Institute for Advanced Architecture of Catalonia, em Barcelona.

O relato de Rudenko (2015) sobre o transporte e montagem de sua impressora 3D de concreto, de Minnesota às Filipinas, revela que essa lógica demanda mais empenho que aparenta. Rudenko relata que dedicou alguns meses no preparo das principais partes em Minnesota e na logística de envio às Filipinas.

Um outro ponto a observar como afirmador desse princípio é considerar a impressão de partes do edifício para posterior montagem. Algumas firmas de arquitetura reconhecem essa vantagem e vêm colocando em prática esse princípio. Segundo Lipson e Kurman, a alta capacidade de produção, por metro quadrado ocupado, torna as impressoras 3D ideais para o uso doméstico ou no escritório.

3.1.8 Princípio 8 - Menor perda de material

Lipson e Kurman vinculam este princípio unicamente ao uso de impressoras 3D que trabalham com metal. O motivo da singularidade desse material é que, na fabricação tradicional subtrativa, ele é considerado, segundo os autores, um material em que o desperdício é estimado em noventa por cento.

O método de manufatura aditiva incumbido de evitar esse desperdício é o SLS. Como já foi explicado, esse método, por utilizar como suporte o próprio pó disposto na cama de impressão, o qual pode ser reutilizado, não há de fato desperdício.

Na manufatura subtrativa, o contraste entre o custo do volume final da peça e do bloco do qual ela foi subtraída é muito maior do que, por exemplo, a quantidade de material desperdiçado com suportes na manufatura aditiva.



Figura 118 - Exemplo de fabricação subtrativa onde o volume de material retirado foi 97% (DAISHIN, 2016)

O que não foi mencionado por Lipson e Kurman é que esse método funciona virtualmente com qualquer material que possa ser transformado em pó, inclusive o plástico. Talvez o motivo de omissão dessa informação se dê pelo fato de, para o plástico, processos de fabricis convencionais, como a rotomoldagem, são igualmente eficientes quanto ao pouco desperdício material, quando comparados aos processos de impressão 3D SLS ou FDM.

No método FDM, os suportes construídos durante a impressão não podem ser reutilizados. A necessidade de suportes de impressão, que podem ser internos ou externos, aumenta a quantidade de material usado.

No campo da arquitetura e construção, a análise da aplicação do princípio de menor perda material passa pelos mesmos conceitos aqui expostos. No método Binder jet, desenvolvido por Enrico Dini, há uso de cama composta de pó de impressão como suporte, o que torna verdadeiro o princípio da ausência de desperdício. No método Contour Crafting, o desperdício também é nulo, se comparado ao método de assentamento de tijolo de alvenaria utilizado por grande parte dos países não industrializados que pode realmente ter impacto relevante, mas precisa ser comparado a outros métodos de construção “seca” onde o desperdício é menor. Pode ser que, nessa comparação com métodos de construção a seco, o método de fabricação aditiva não tenha a superioridade dita nesse princípio.

3.1.9 Princípio 9 - Infinitos tons de materiais

Hoje, os equipamentos de fabricação baseados no corte, na subtração e no uso de moldes impossibilitam a mistura de diferentes matérias-primas em um único objeto.

Com o desenvolvimento de métodos de impressão multimaterial é visto o ganho da capacidade de mesclar gradualmente diferentes matérias-primas em infinitas proporções. Anteriormente inacessível, essa nova mistura oferece propriedades materiais pouco exploradas, com possibilidade para inovação e programação do comportamento do material (Lipson, 2013).



Figura 119 - Imprimindo com propriedades materiais graduais (HUANG, 2016)

Possibilidades derivadas desse princípio vêm sendo monitoradas, testadas e analisadas em laboratórios de pesquisa aplicada à arquitetura. Algumas impressoras com essa capacidade já estão disponíveis no mercado, e adaptações em outras máquinas vêm sendo também realizadas com foco no uso desse conceito.

A arquiteta e pesquisadora Neri Oxman está à frente de pesquisas que envolvem esse princípio presente na impressão 3D. Ela coloca como uma quebra de paradigma em relação ao modo como foi pensado até então as juntas de materiais diferentes, que agora podem ser graduais.



Figura 120 - Fabricology, MIT media Labs (OXMAN, N. 2016)

Esse princípio pode ter suas possibilidades ampliadas se, além das propriedades dos materiais, forem programadas mudanças no comportamento dos objetos através de alterações em sua geometria, como vemos na maçaneta do princípio 3 desse tópico.

3.1.10 Princípio 10 - Réplicas físicas precisas

Este princípio depende hoje do uso do scanner 3D ou da cópia do arquivo digital. Lipson e Kurman defendem que, como um arquivo de música digital pode ser copiado infinitamente com a mesma qualidade, no futuro, a impressão 3D tende a expandir essa possibilidade para objetos físicos.

A impressão 3D e a digitalização, que hoje utiliza scanners com tecnologia de nuvem de pontos (fotogrametria), irão juntas, segundo os autores, incorporar interações de alta resolução entre o mundo físico e o digital.

O princípio da criação de réplicas físicas precisas, onde é possível duplicar objetos, ou os editar digitalmente e torná-los físicos posteriormente, é o princípio que mais é alvo das análises regulatórias e legais. O impacto nos aspectos da propriedade intelectual e direito de reprodução está no centro das discussões, juntamente com a possibilidade de impressão de armas de fogo.



Figura 121 - Scanner 3D (ARTEC, 2017)

O uso do scanner 3D portátil, hoje adaptáveis à smartphones, facilita a possível réplica de edifícios inteiros, sujeitando a arquitetura a esse princípio.

A análise do que pode acontecer a partir dessas possibilidades está muito mais ligada aos aspectos legais que a mudanças no ambiente construído, mas, de fato, pode haver casos pontuais onde o uso dessa tecnologia possua um alcance maior.

Frank Gehry já usa, em sua prática, scanners como esse, sendo um exemplo de arquiteto precursor da interação físico-digital, como proposto pelos autores.

3.1.11 Conclusões

Não se pode pensar na manufatura aditiva como substituto da confecção de qualquer elemento arquitetônico, como peles de vidro ou perfis metálicos, simplesmente por que esses componentes e materiais têm sua própria linha de evolução de manufatura adaptada às suas características próprias. Um vidro plano muito dificilmente, mesmo anos à frente, terá sua fabricação facilitada pela manufatura aditiva, quando comparado com sua manufatura específica. A impressora 3D tem muita funcionalidade, mas não se pode querer fazer dela uma máquina universal, principalmente uma máquina que faz tudo de uma só vez. De fato, é preciso deixar isso bem claro, distinguindo cada função e conceito.

O posicionamento dos autores Lipson e Kurman, muitas vezes focando possibilidades futuras, é importante por que os conceitos desses princípios são fortes e bem definidos apesar de não serem totalmente alcançados na prática. É um modo de estimular o pensar de novas formas para conseguir chegar no cerne de sua real

aplicação e utilidade. Esses princípios, realizáveis ou não, funcionam como um bom grupo de parâmetros para análises dos alcances da tecnologia em sua possível evolução. Por estarem ainda em um contexto de desenvolvimento futuro podem continuar sendo atuais por longo período.

De modo geral, analisar esses princípios separadamente parecem retratar uma vantagem não tão real. Críticas e comparações em pontos onde a impressão 3D teria desvantagens em relação a outros métodos de fabricação não foram expostas por Lipson e Kurman, talvez pelo caráter temporário dessas limitações, talvez por imaginar um cenário de “um ideal”. É preciso cuidado, tanto para que esse cenário ideal não seja totalmente utópico, como para não julgar como permanentes os limitantes temporais. Cabe aqui a observação de Picon (2004), traçando um paralelo com sua análise da arquitetura digital, em relação aos cuidados necessários ao analisar uma tecnologia ainda em sua infância. Há ainda algumas patentes próximas de se tornarem de domínio público, o que está sempre associado à maturação da tecnologia. A patente de impressão SLS em metal é a próxima na lista.

Mas é mesmo preciso analisar a impressora 3D separadamente por cada método de impressão, para conseguir um cenário mais próximo do real, do que tratar a impressão 3D como uma máquina universal. Devem ser esclarecidos a observação da capacidade de cada equipamento e o método da manufatura aditiva antes de serem realizadas proposições generalizadas.

Alguns desses princípios possuem sua adaptação, imediata à tectônica da arquitetura, fragilizada. Mesmo que o princípio proposto venha a ser aplicável à fabricação aditiva de edifícios ou componentes, por vezes a vantagem do princípio é elevada pelos autores a um ponto onde a desvantagem é mascarada, a fragilidade ou limitação parecem não existir ou não ser relevante. Mas a verdade é que possui. A omissão desse ponto frágil é evidente em diversas publicações na mídia, principalmente as mais afastadas de propósitos investigativos ou análises. Portanto é preciso cautela ao observar publicações emotivas ou motivadas pelo fascínio diante da tecnologia, até então pouco conhecida, e de suas promissoras facilidades e promessas. Algumas das notícias oferecem características entusiásticas e tornam-se virais em ambiente virtual com matérias sensacionalistas.

Há um principal fator motivador na não exaltação dos pontos frágeis pelos autores, e esse motivo deve ser investigado de modo bem plausível. O fator é a “limitação temporal”, ou seja, uma limitação que tende a ser solucionada em futuras

gerações da tecnologia. Comumente esse tipo de desvantagem momentânea ocorre em três aspectos distintos: o da velocidade de impressão, o da resolução da impressão e o valor econômico associado. Esse, no entanto, não é uma exclusividade da impressão 3D; pelo contrário, é um fenômeno na linha do tempo de todo aparato tecnológico. Tendo influência inclusive da chamada “obsolescência programada”, já mapeada e ilustrada de modo evidente em vários gráficos, é a relação de custo tecnológico na linha de tempo a contar do surgimento da tecnologia. Vemos isso em impressoras convencionais, computadores, smartphones e virtualmente todo artefato tecnológico eletrônico. Na impressora 3D não é diferente.

Como o fator tempo é uma variável importante na construção de edifícios, é necessário atribuir relevância a essa limitação tecnológica temporária, é observável em edifícios com construção propostas através de impressoras as quais nunca foram finalizados.

“Some of these principles already hold true today. Others will come true in the next decade or two (or three). By removing familiar, time-honored manufacturing constraints, 3D printing sets the stage for a cascade of downstream innovation (...) will change the ways we work, eat, heal, learn, create and play. Let's begin with a visit to the world of manufacturing and design, where 3D printing technologies ease the tyranny of economies of scale.”²⁸ (LIPSON; KURMAN, 2013)

Com a indústria de impressoras 3D esperando um recorde de vendas de quase 500.000 impressoras em 2016, Gilpin (2014) chama a atenção para que a impressora 3D é uma espada de dois gumes. Afirma que a tecnologia é para transformar a sociedade em melhor, mas que também não se podem ignorar as potenciais consequências negativas.

Ela reconhece os princípios de Lipson e Kurman ao mencionar o lado positivo da tecnologia:

“As with any new technology, it's easy to get swept up in the benefits of 3D printing. It opens up a world of new possibilities

²⁸ Alguns dos princípios vistos já são verdadeiros hoje. Outros se tornarão realidade na próxima década ou duas (ou três). Ao remover as restrições de fabricação tradicionais, a impressão 3D prepara o cenário para uma série de inovações (...) que mudarão as formas como trabalhamos, comemos, curamos, aprendemos, criamos e jogamos. Vamos começar com uma visita ao mundo da fabricação e design, onde as tecnologias de impressão 3D vão aliviar a tirania de economias de escala (tradução nossa)

for all industries, and stands to lessen transportation costs, environmental impacts, waste, and reliance on corporations by enabling the maker movement.”²⁹(GILPIN, 2014)

No entanto, Gilpin enumera dez perigos e impactos potencialmente negativos de impressoras 3D que ainda não foram profundamente investigados.

O primeiro é que, nos métodos de fusão de plástico com calor ou lasers, as impressoras 3D consomem cerca de 50 a 100 vezes mais energia elétrica do que a moldagem por injeção para fazer um item do mesmo peso, de acordo com pesquisa da Universidade de Loughborough. Em 2009, a pesquisa no programa de Manufatura Ambientalmente Benigna³⁰ do MIT mostrou que a deposição direta de metal por laser (onde o metal em pó é fundido) usou centenas de vezes a eletricidade como fundição tradicional ou usinagem. Devido a isso, as impressoras 3D só seriam ambientalmente vantajosas quando a intenção for produzir em pequenas tiragens. Impressoras 3D de tamanho industrial podem não ser a resposta para diminuir nosso uso de energia de carvão em breve.

O segundo impacto negativo é o de emissões atmosféricas insalubres. Segundo a jornalista, impressoras 3D podem representar um risco para a saúde quando usadas em casa. De acordo com pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Illinois, as emissões de impressoras 3D desktop são semelhantes à queima de um cigarro ou cozinhar em um fogão a gás ou elétrico. O estudo de 2013 foi o primeiro a medir essas emissões de partículas no ar a partir de impressoras 3D desktop. Enquanto aquecem o plástico e imprimem pequenos objetos, as máquinas que usam filamento de PLA emitiram 20 bilhões de partículas ultrafinas por minuto e o filamento ABS emitiu até 200 bilhões de partículas por minuto. Essas partículas podem assentar nos pulmões ou na corrente sanguínea e representam risco para a saúde, especialmente para aqueles com asma.

O terceiro impacto é o da dependência de plásticos. Filamentos de plástico ABS são o material mais comum usado em impressoras 3D. Um dos maiores movimentos ambientais da história recente tem sido reduzir a dependência de plásticos, de sacos de supermercado a garrafas de água para objetos domésticos que

²⁹ Como com qualquer nova tecnologia, é fácil exaltar os benefícios da impressão 3D. Ela abre um mundo de novas possibilidades para todas as indústrias, e está diminuindo os custos de transporte, impactos ambientais, desperdício e permitindo o movimento Maker. (tradução nossa)

³⁰ Environmentally Benign Manufacturing

podem ser feitos de materiais reciclados. As impressoras 3D mais populares e mais baratas utilizam filamentos de plástico. Embora a utilização de matérias-primas reduzam a quantidade de resíduos em geral, as máquinas ainda deixam plástico não utilizado ou em excesso nas camas de impressão. PLA é biodegradável, mas o filamento de ABS ainda é o tipo mais comumente usado de plástico. O subproduto plástico acaba em aterros sanitários. Se a impressão 3D for industrializada, esse subproduto ou outro plástico reciclado precisam ser reutilizados.



Figura 122 - a) Microestação de reciclagem de plásticos para impressão precious plastic (HAKKENS , 2016) b) Filamento para FDM (3D SYSTEMS, 2016)

Do mesmo modo, o uso do concreto, um material que em sua produção incorpora muita energia, pode ser visto como um impacto negativo dos métodos de impressão em concreto. Algumas propostas como a da empresa Win Sun e as da Universidade de Eindhoven propõem o uso de concreto reciclado como uma alternativa de contornar essa problemática.

Outros impactos citados são da esfera normativa e da necessidade de adaptação de leis, como mudanças nas normas de propriedade intelectual e licenciamento, mudanças no controle de armas, controle de qualidade de fabricação, segurança de itens que entram em contato com alimentos, regulamentação e ética da impressão na área médica, possibilidades de produção de drogas e até mesmo problemas de segurança nacional. Há discussões e alguns artigos publicados a respeito da possibilidade de “invadir” uma impressora por métodos hackers, e causar o mau funcionamento do objeto impresso. Esses artigos sugerem novas formas de controle de situações como essa.

3.2 A relação entre processo de projeto e a Impressão 3D

Projetar e construir são duas atividades com que a arquitetura se preocupa fundamentalmente. A habilidade de comunicar efetivamente as ideias criativas continua sendo um aspecto central da disciplina. Com os inúmeros programas computacionais disponíveis, os caminhos possíveis ao arquiteto podem influenciar na capacidade ou não de materializar determinada arquitetura.

Para utilizar efetivamente a impressão 3D, é preciso mapear precisamente as restrições materiais e as reproduzir digitalmente dentro do processo de projeto. Talvez pela ausência de estudos consolidados de como isso pode ser feito na arquitetura, os equipamentos e conceitos dos princípios da impressão 3D não foram ainda aplicados com destreza.

Na análise a seguir serão coletados dados quantitativos na tentativa de ilustrar a relação entre projetar e materializar dentro da Arquitetura digital e fabricação digital por manufatura aditiva.

3.2.1 Radiolaria

No pavilhão Radiolaria, projetado por Andrea Morgante com processo de modelagem 3d convencional CAD, foi consolidado o princípio 1 - Complexidade Grátis, 3 - da ausência de necessidade de montagem, tendo em vista que o pavilhão é composto de uma única peça impressa, 5 – Liberdade de Formas e 8 – economia de material, já que o método utilizado dispensa a necessidade de suporte.



Figura 123 - ilustração dos princípios incorporados pelo projeto (SILVA, 2017)

3.2.2 Proto-House

No projeto Proto-House, projetado por Softkill, foram aplicados os princípios 1, 2, 5, 6, 8 e 9, com destaque para o princípio 8 de economia de material, já que a estrutura impressa não usou suportes e teve sua estrutura otimizada com espaços vazios pelo uso de algoritmo. Destaque também para o princípio 5 (liberdade de

formas), 2 (variedade é grátis) e 1 (complexidade é grátis), todos obtidos pelo uso de algoritmo generativo.



Figura 124 - ilustração dos princípios incorporados pelo projeto (SILVA, 2017)

O projeto Proto-house, proposto em 2012, nunca foi impresso em escala real. O motivo do abandono do projeto não foi encontrado ou divulgado pelo escritório, no entanto o projeto entrou na análise por ser possível de materialização com o método de impressão com braços robóticos e extrusão de estrutura em látice, que alteraria muito pouco o conceito original.

3.2.3 Building Bytes



Figura 125 - ilustração dos princípios incorporados pelo projeto (SILVA, 2017)

No projeto de Brian Peters utilizando ferramentas paramétricas, vale destacar o princípio 4 (tempo de entrega é zero) e 7 (compacta e portátil), por ter sido impresso no local e com impressora de pequeno porte. Destaca-se também o princípio 9 de infinitas possibilidades materiais, já que Peters adaptou o bico da impressora para ser usado com um material diferente do definido pelo fabricante. É um caso em que o arquiteto confecciona o equipamento com conhecimento de outras áreas.

3.2.4 Landscape House



Figura 126 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017)

O projeto Landscape House proposto para ser executado pela D-Shape foi projetado pelo escritório Universe Architecture, com ferramentas de modelagem convencional CAD, gerando superfícies de dupla curvatura. O projeto nunca foi realizado, não tendo sido encontrada menção ao motivo do abandono do projeto, que seria executado com diversas peças. Provavelmente o motivo foi o não estabelecimento de uma técnica adequada para o reforço da estrutura de concreto em balanço, que visivelmente conta com vãos mais amplos do que os possíveis.

3.2.5 Casa do canal

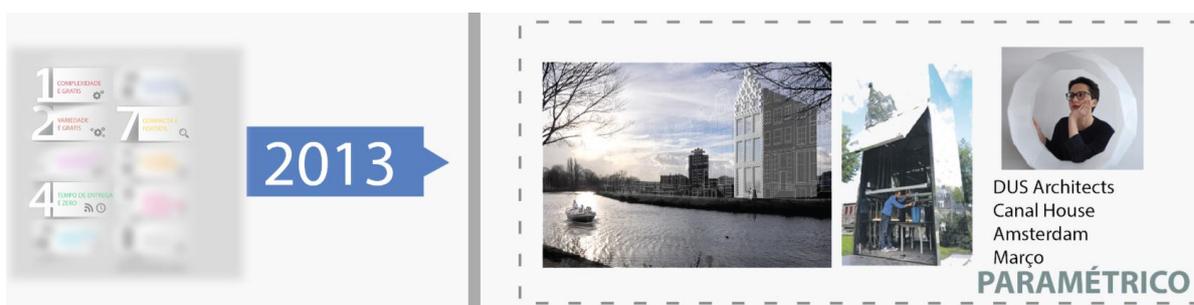


Figura 127 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017)

O projeto da casa do canal do escritório DUS, em construção desde 2013, é um dos mais aguardados entre os de aplicação da Manufatura Aditiva na AEC. O projeto paramétrico da casa contempla os princípios 1, 2, 4 e 7. Destaque para os princípios 2 e 4, considerando respectivamente ser a variedade grátis, por possuir diversas partes sem nenhuma repetição, e compacta e portátil por ser impressa por impressora de médio porte no próprio local.

3.2.6 Echoviren

Do projeto desenvolvido pelo estúdio Smith/Allen destaca-se o princípio 6, (necessidade técnica é nula) por ter sido realizado por duas pessoas sem experiência prévia com impressoras 3D. O projeto é bastante representativo também por ter sido

o primeiro a utilizar impressoras desktop de pequenas dimensões, e, portanto, o princípio 7 (compacta e portátil).



Figura 128 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017)

O projeto faz uso de quase todos os princípios, com exceção do: 3, por ter necessitado montagem; 9, por ter utilizado um único material; e 0, por ser um objeto único e não uma réplica, apesar de que, por ser possível de ser impresso em uma impressora de pequeno formato, poderia ser facilmente replicado.

3.2.7 Digital Grotesque



Figura 129 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017)

Do projeto Digital Grotesque de Michael Hansmeyer e Benjamin Dillenburger, destaca-se o vasto uso dos princípios 1 (complexidade é grátis), 2 (variedade é grátis) e 5 (liberdade de formas). As formas do projeto só foram possíveis graças ao uso do método de projeto de algoritmo generativo, que neste caso está diretamente associado com a aplicação dos princípios 1,2 e 5.

3.2.8 Adrian Priestman

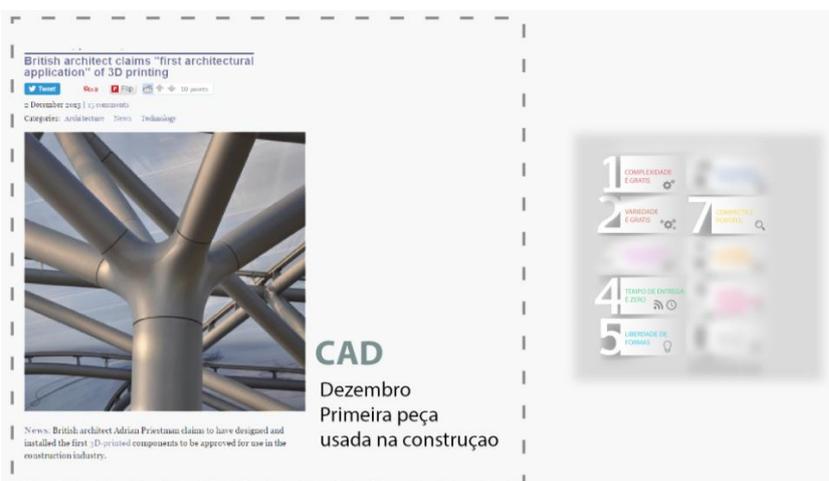


Figura 130 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017)

O componente projetado por Adrian Priestman contempla os princípios 1, 2, 4, 5 e 7, com destaque para o 7 (compacta e portátil), por se tratar de um elemento de conexão pode ser impresso em impressora de pequeno porte.

3.2.9 Rudenko



Figura 131 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017)

O projeto de Andrey Rudenko destaca-se pelos princípios 6 e 8, por ter sido realizado por Rudenko que não contava com nenhuma experiência com projeto arquitetônico. Rudenko, no entanto, como próprio desenvolvedor da impressora, conta com conhecimento técnico para funcionamento de sua própria criação. Há que se acrescentar o fato de ter sido realizado no quintal de casa, sem a necessidade de elementos de suporte, o que proporcionou também a economia de material, portanto o uso do princípio 8.

3.2.10 Win Sun



Figura 132 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017)

As casas impressas pela empresa chinesa Win-Sun demonstram pouca exploração de aspectos formais. Destaca-se, no entanto, a utilização de resíduos de construção na composição do concreto utilizado, aplicando o princípio 8 não por uma questão de projeto ou de pouco desperdício, mas por um desenvolvimento da ciência dos materiais com um possível impacto ambiental positivo.

3.2.11 ARUP



Figura 133 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017)

O elemento desenhado pela empresa ARUP destaca-se pela associação dos princípios 1, 4, 5 e 8, todos relacionados à utilização do método generativo de otimização. A otimização é o maior foco deste projeto, que visa conseguir a mesma propriedade estrutural utilizando a menor quantidade de material, portanto um grande exemplo arquitetônico do princípio 8, bastante almejado em outros campos como o da aeronáutica e automobilístico.

3.2.12 MX3D



Figura 134 - ilustração dos princípios incorporados (SILVA, 2017)

A ponte de aço da empresa MX3D foi a que alcançou a maior quantidade de princípios, com exceção apenas dos princípios: 6 – necessidade técnica é nula, já que é um projeto que conta com o maior número de especialistas e precisou atravessar um grande número de obstáculos; e 7 – compacta e portátil, já que, mesmo usando robôs que não sejam de difícil transporte, a ponte precisou ser impressa no ambiente controlado do galpão, e não a céu aberto como foi inicialmente proposta.

No que diz respeito ao processo de projeto, vale destacar que o projeto inicial havia sido desenvolvido com ferramentas generativas, no entanto o projeto não atendeu a requisitos de segurança e engenharia estrutural. Na segunda e definitiva versão do projeto foi utilizado um processo de modelagem paramétrica, e em seguida por um processo de otimização generativa.

3.2.13 Conclusões

Após a identificação dos processos de projeto aplicados nos casos de impressão 3D estudados, a presença dos princípios propostos por Lipson e Kurman foi avaliada individualmente em cada projeto. Percebe-se que a relação entre o tipo de impressora e o material usado está ligada ao alcance do projeto em aplicar o princípio. Por exemplo, o robô é adequado para imprimir as estruturas em solda, porque o material se sustenta no ar, sem a necessidade de suporte, ou mesmo com plástico desde que projetado considerando quesitos de resistência estrutural. Já o mesmo robô, podendo imprimir também em concreto, devido às propriedades materiais do concreto, não consegue sem suporte imprimir estrutura livre no ar.

Nos 12 projetos analisados cada princípio proposto por Lipson e Kurman pode ser observado em aplicação ao menos uma vez, como foi o caso do princípio 10 (réplicas precisas) o que teve menos incidência.

Os princípios 1 (complexidade é grátis), 2 (variedade é grátis) e 5 (liberdade de formas, todos eles ligados a aspectos formais, estão entre os mais explorados. Os princípios citados foram observados respectivamente em 9, 8 e 7 projetos, sugerindo a intenção do projetista em se beneficiar destas liberdades do método de fabricação. O princípio 9 (infinitas possibilidades materiais), ainda que também ligado a liberdade de inovação, foi pouco utilizado (em apenas 3 projetos), o que talvez esteja ligado ao custo de acesso a máquinas com esta função e a maturação específica desta facilidade tecnológica.

Ligado a questões ambientais e econômicas, o princípio 8 (economia de material) figura entre os mais observados, presente em 8 dos 12 projetos. Refletindo uma possível confirmação deste princípio, proposto por Lipson e Kurman, e defendido também por outros pesquisadores como Koshnevis e pelo meio corporativo, na figura das empresas.

Observando a incidência dos princípios 3 (não necessita montagem), 4 (tempo de entrega é zero), 6 (necessidade técnica é zero) e 7 (compacta e portátil), que foram encontrados respectivamente em 2, 6, 3 e 4 dos projetos analisados, pode ser inferido que são princípios que podem sim ser aplicados em casos específicos, mas não são uma máxima no uso dessa tecnologia.

No tocante ao processo de projeto CAD, paramétrico, algoritmo e generativo foi observado que foram utilizados respectivamente em 5 (CAD), 3 (paramétrico), 2 (algoritmo) e 2 (generativo) projetos. Os projetos com metodologia CAD tiveram o menor uso de princípios, com uma média de 2,8 princípios por projeto. Os projetos com método generativo tiveram uma média de uso de 6 dos princípios propostos por Lipson e Kurman, por projeto, sendo essa a maior média entre os processos de projetos arquitetônicos digitais. O processo de projeto paramétrico e o processo de projeto com algoritmo tiveram uma média de 5,3 e 4,5 princípios respectivamente.

A quantidade de opções e variáveis possíveis da aplicação da Manufatura Aditiva na Arquitetura, Engenharia e Construção requer análises mais profundas para constituir relações mais sólidas entre os diversos métodos. E isso pode levar mais tempo do que o decorrido até então nesse campo. Podemos nesse sentido fazer um paralelo com o que sintetizou Iwamoto (2009), sobre a relação entre os primeiros métodos de projeto e o início da fabricação digital:

"Architects have been drawing digitally for nearly thirty years. CAD programs have made two dimensional drawing efficient, easy to edit, and, with a little practice, simple to do. Yet for many years, as the process of making drawings steadily shifted from being analog to digital, the design of buildings did not really reflect the change. CAD replaced drawing with a parallel rule and lead pointer, but buildings looked pretty much the same. This is perhaps not so surprising-one form of two-dimensional representation simply replaced another. It took three-dimensional-computer modeling and digital fabrication to energize design thinking and expand the boundaries of architectural form and construction."³¹(IWAMOTO, 2009, p. 5)

A arquitetura mudou radicalmente no século XX devido ao desenvolvimento de novos materiais e tecnologias. Como afirmado por Kolarevic (2003), "os materiais livremente moldáveis, como o concreto e os plásticos, levaram, por exemplo, a um interesse renovado nas formas "blob" nas décadas de 1950 e 1960". Mas métodos mais inovadores ocorridos após o modernismo no século 21 foram possíveis pelo computador sob a forma de concepção e fabricação digital. No entanto, esses desenvolvimentos novos e significativos vislumbrados nessa análise em projetos de vanguarda experimental, atualmente não estão refletidos na arquitetura como um todo, embora possam oferecer muitos benefícios.

³¹ Arquitetos desenharam digitalmente por quase trinta anos. Os programas de CAD fizeram o desenho bidimensional eficiente, fácil de editar e, com um pouco de prática, simples de fazer. No entanto, durante muitos anos, à medida que o processo de fazer desenhos mudou de ser analógico para ser digital, o design dos edifícios não refletia realmente uma mudança. O CAD substituiu o desenho com esquadro e régua paralela, mas os edifícios pareciam bastante iguais. (Isso talvez não seja tão surpreendente - uma forma de representação bidimensional simplesmente substituiu outra.) Foi preciso a modelagem tridimensional em computador e a fabricação digital para dinamizar o pensamento do projeto e expandir os limites da forma arquitetônica e da construção. (tradução nossa)

Conclusão

O propósito desta dissertação de mestrado foi investigar o recente avanço na utilização de impressoras 3D por arquitetos, como uma forma de materializar em escala real a arquitetura concebida por meios de processos de projetos digitais.

Por se tratar de um campo ainda pouco explorado, esta dissertação intencionalmente optou por um recorte amplo, a fim de possibilitar a compreensão do estado da arte dessa vertente da fabricação digital, e com que finalidade os arquitetos vêm buscando o uso desta tecnologia.

Com esta intenção iniciou-se com o histórico do surgimento da arquitetura digital, utilizando como base bibliográfica os estudos da autora Rivka Oxman sobre a primeira era da arquitetura digital, e sua catalogação e classificação dos processos de projeto dessa era. Sendo os modelos mais notáveis dessa era o CAD, o de formação, o generativo, o de desempenho e os modelos compostos.

A revisão de literatura da segunda era da arquitetura digital continuou tendo por base a literatura de Rivka Oxman, inserindo também outros autores, complementando a compreensão de temas como a arquitetura do desempenho, a tectônica digital, a morfogênese digital e a arquitetura evolutiva, além de outros caminhos teóricos e práticos da arquitetura contemporânea.

O presente estudo em seguida apresenta o surgimento da tecnologia de impressão 3D, trazendo informações importantes dos principais métodos de impressão. E propõe analisar os dez princípios da impressão 3D postulados pelos autores Lipson e Kurman. A intenção neste momento da pesquisa foi validar a aplicação destes princípios, postos como genéricos, dentro do campo específico da arquitetura.

Com os exemplos do uso da impressão 3D, para arquitetura em escala real, uma vez mapeados foi possível usar os princípios estudados como parâmetros comparativos. Visando entender como o processo de projeto utilizado pelo arquiteto, pôde em cada caso vincular-se a determinado princípio.

A análise realizada permitiu inferir lógicas qualitativas dentre os exemplos de utilização por arquitetos, seus processos e obtenção e validação dos princípios da impressão alcançados. Indicando a liberdade formal como o mais evidente ganho presente no uso da tecnologia por arquitetos, podendo eles também em determinados casos tirar proveito de outras possibilidades, eventualmente observadas.

Foi identificado limitantes neste estudo, destacando a necessidade de implementar critérios mais claros e definidos, na classificação dos estudos de casos quanto ao processo de projeto a ele vinculado. Bem como o mesmo pode ser dito quanto a necessidade de estabelecer previamente e claramente quais critérios serão levado em consideração para determinar se um projeto atende dado princípio da impressão 3D.

Além das limitações explicadas, outras podem ser apontadas, como o critério para escolha dos exemplos de estudo de caso. Ainda assim considera-se o presente estudo um ponto de partida para novas avaliações que envolvam as temáticas de processos de projeto e possibilidades da impressão 3D.

Ainda que um dos princípios indique a não necessidade de conhecimento técnico acerca da tecnologia, para que seja possível realizar o projeto, e mesmo que em certos casos isso se comprove, é importante ressaltar que o conhecimento técnico e a escolha adequada do método de impressão são imprescindíveis na maioria dos casos observados.

Mesmo com as muitas vantagens em potencial que a impressão em 3D pode oferecer, as expectativas sobre a tecnologia são muitas vezes exageradas pelos meios de comunicação, por empresas e até por pesquisadores. Isso promove cenários pouco realistas, especialmente em relação ao quão em breve algumas das possibilidades mais esperadas vão de fato acontecer.

Deve ser notado que a impressão 3D não remove todas as restrições de fabricação. Em vez disso, as substitui por um conjunto diferente de lógicas que os arquitetos devem levar em consideração, se desejam obter sucesso com a tecnologia. Essas novas considerações de materialização dos projetos são, no entanto, muito mais fáceis para os arquitetos entenderem e usufruírem do que as exigências dos demais métodos de fabricação digital. Destacando que elas atendem a intenção do projeto, não o modificando de uma maneira importante.

Embora o tempo necessário para a implementação da tecnologia seja difícil de prever, é possível presumir que a fabricação com impressão 3D possa, um dia, substituir as técnicas de fabricação digital convencionais da arquitetura. Embora muito disso pareça uma ficção científica, já está começando a ocorrer grande quantidade de inovação e a frequência com que isso vem desenvolvendo-se está acelerando.

Esta dissertação apresenta alguns exemplos dos caminhos pelos quais as tecnologias de impressão 3D estão permitindo. No entanto, é mais possível especular,

do que de fato comprovar como algumas das mudanças provocadas pela melhoria de tecnologias de impressão 3D influenciarão o futuro do arquiteto.

Os principais processos de impressão 3D em grande escala foram revisados e comparados em termos de suas principais características. Cada um demonstrou ter pontos fortes e fracos, e os arquitetos vêm explorando como escolher a melhor opção de projeto para alinhar com os benefícios específicos e minimizar os desafios ou limitações dos métodos.

O processo de impressão de concreto foi explorado em detalhes e foi evidenciado os graus de liberdade de projeto e precisão de fabricação dos dois métodos mais comuns, o *Contour Crafting* e o desenvolvido pela empresa D-Shape. Com o destaque para integração funcional do elemento de concreto, economia de material e eliminação de formas e moldagem, além da ausência intensiva de mão-de-obra, o que não é possível com processos de construção convencionais.

Os componentes de construção de concreto de tamanho significativo são pesados, atingindo facilmente toneladas. Levantar e mover essas partes não é simples. Isso sugere uma necessidade de impressão de peças no local, seguida de montagem ou mesmo a impressão do edifício por completo, como visto no método *Contour Crafting*. Uma desvantagem, no entanto, é a sensibilidade que esse método apresenta em regiões com grandes variações climáticas e a ausência de um método satisfatório de incluir o aço no processo, para a confecção do concreto armado.

Uma proposta mais eficiente quanto aos pré-requisitos de qualidade é baseada na fabricação de grandes componentes em um ambiente controlado, portanto bem alinhada com o movimento dentro da indústria da construção existente. Longe da produção no local, é possível aumentar a qualidade, velocidade de produção e saúde e segurança. A fabricação aditiva de componentes de construção em grande escala ainda é uma tecnologia emergente, mas que está se tornando uma realidade.

Conclui-se que as inter-relações entre as áreas de estudo pesquisadas (arquitetura, engenharia, biologia e computação) geram grandes reflexões sobre as metodologias de processo de projeto digitais que impulsionam evoluções nos âmbitos tecnológicos e ambientais. Faz-se necessária toda uma transformação na cadeia produtiva da construção civil, desde projetistas - na concepção - até profissionais envolvidos na execução de obras arquitetônicas, para oferecer edifícios que retratem verdadeiramente essa era digital.

Percebe-se que a fabricação digital e a impressão 3D são temáticas recorrentes não principais instituições de pesquisa e ensino da esfera acadêmica da arquitetura nas grandes cidades, assumindo o foco em grupos de pesquisas interdisciplinares, tendo destaque em congressos internacionais e em crescente número de publicações científicas.

Destaca-se o avanço que o uso do braço robótico com múltiplos eixos possibilitou aos métodos de impressão 3D, e os espaços e relações que estes e outros mecanismos robóticos, como drones, vem apresentando no leque de possibilidades da fabricação digital.

Considera-se relevante para futuras investigações o cruzamento das possibilidades dos mecanismos robóticos de fabricação digital e impressão 3D com as implementações da tecnologia dos materiais e novas correntes da arquitetura contemporânea. Facilitando o papel do arquiteto e pesquisador - envolto nas correntes da computação material, arquitetura cinética, biomimética e sistemas físico-cibernéticos - como desenvolvedor de processos de projeto e de fabricação.

Buscou-se contribuir com a implementação de um panorama que guie o arquiteto contemporâneo em um processo de projeto, onde a impressão 3D diminua a lacuna entre a discussão acadêmica dos conceitos teóricos do parametricismo, morfogênese e arquitetura evolucionária, favorecendo as aplicações efetivas desses conceitos na produção arquitetônica contemporânea.

Referências

- AISH, Robert. **Extensible computational design tools for exploratory architecture**. Architecture in the digital age: design and manufacturing. Spon Press, New York, NY, 2003. KOLAREVIC, Branko; MALKAWI, Ali. **Peformative Architecture: Beyond Instrumentality**. Routledge, 2005.
- BEAMAN, Joseph J. et al. **Solid freeform fabrication: a new direction in manufacturing**. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, v. 2061, p. 25-49, 1997.
- BEESELEY, P.; SEEBOHM T., **Digital tectonic design**, Proceedings of eCAADe Conference, Hannover, Germany, 2000.
- BEESELEY, Philip. **Responsive architectures: Subtle Technologies**, Cambridge, Ont.: Riverside Architectural Press, 2006.
- BELIKOVETSKY, S. et al. **drOwned-Cyber-Physical Attack with Additive Manufacturing**. 2016.
- BEORKREM, C. **Material strategies in digital fabrication**. Routledge, 2013.
- BOCK, Thomas; LANGENBERG, Silke. **Changing Building Sites: Industrialisation and Automation of the Building Process**. Architectural Design, v. 84, n. 3, p. 88-99, 2014.
- BRANCH, Technology. **SHoP Pavilion**. Disponível em <https://www.branch.technology/projects-1/2017/6/9/shop> acesso em 20 de junho de 2017.
- BURRY, M. **Between Intuition and Process: Parametric Design and Rapid Prototyping**, in Kolarevic, B. ,ed. Architecture in the Digital Age Design and Manufacturing, Spon Press, New York and London, 2003, pp. 149-162.
- BUSWELL, R. A.; SOAR, R. C.; GIBB, A. G. & THORPE, A. 2007. **Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction**. *Automation in construction*, 16(2), 224-231.
- CABRAL FILHO, J. S. **The ethical implications of automated computation in design**. *Kybernetes*, Vol. 42 Iss: 9/10, pp.1354 – 1360, 2013.
- CARPO, M. **The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence (Writing Architecture)**, MIT Press, 3 Nov 2017 .
- CORE-BAILLAIS, Marine; BENSOUSSAN, Hannah; RICHARDOT, Amandine & KUSNADI Hilmiyati, **The State of 3D Printing**, Sculpteo, Disponível em https://www.sculpteo.com/media/ebook/State%20of%203DP%202017_1.pdf, 2017. Acesso em 21 de janeiro de 2018.
- DIEGEL, O. **Additive manufacturing: the new industrial revolution**. 2011. 1 Auckland University of Technology, Centre for Rapid Product Development, Auckland, New Zealand.
- DINI, E. **Improved Method for Automatically Producing a Conglomerate Structure and Apparatus**. Italy patent application. 2009.
- DINI, Enrico; CHIARUGI, Moreno; NANNINI, Roberto. **Method and device for building automatically conglomerate structures**. U.S. Patent Application n. 11/908,993, 26 jun. 2008.
- DUS, 3D, **Print Canal House Foundation** <https://houseofdus.com/project/3d-print-canal-house/> Acesso em 07 de maio de 2017.

EASA - **Certification Memorandum Additive Manufacturing** EASA CM No.: CM–S-008 Issue 01 issued 04 April 2017 © European Aviation Safety Agency. All rights reserved. ISO9001 Certified. Proprietary document. Copies are not controlled. Confirm revision status through the EASA-Internet/Intranet Disponível em <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA%20CM-S-008%20Additive%20Manufacturing.pdf>. Acesso em 1 de janeiro de 2017.

FAIRS, M. **California duo create "world's first 3D-printed architecture"**. 21 August 2013 <https://www.dezeen.com/2013/08/21/california-duo-create-worlds-first-3d-printed-architecture/> Acesso em 07 de maio de 2017.

FAIRS, M. **Dutch architects to use 3D printer to build a house**, 2013, Marcus Fairs Disponível em <https://www.dezeen.com/2013/01/20/dutch-architects-to-use-3d-printer-to-build-a-house/> Acesso em 07 de maio de 2017.

FAIRS, Marcus. **California duo create "world's first 3D-printed architecture"** disponível em: <https://www.dezeen.com/2013/08/21/california-duo-create-worlds-first-3d-printed-architecture/> 2013 acesso em 10 de julho de 2016.

FARZADI, V. Waran, et al. **Effect of layer printing delay on mechanical properties and dimensional accuracy of 3d printed porous prototypes in bone tissue engineering**. vol. 41, no. 7, pp. 8320–8330, 2015.

FENG, Peng et al. **Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders**. Construction and Building Materials, v. 93, p. 486-497, 2015.

Fratello, R.S. (2015) **Cool Brick**. Disponível em: <http://www.emergingobjects.com/projects/cool-brick/> Acesso em 7 de fevereiro de 2017.

FRAZER, John. **An evolutionary architecture**. Architectural Association, Londres, 1995

FRAZER, John. **Intentionality: the coding of a design concept**. Part of the Evening Lecture Series at the Architectural Association, London, 16 November 2011 Time: 18:00 Venue: Lecture Hall Running time: 100 mins.

FREARSON, Amy. **DUS Architects builds 3D-printed micro home in Amsterdam**. 2016, Disponível em: <https://www.dezeen.com/2016/08/30/dus-architects-3d-printed-micro-home-amsterdam-cabin-bathtub/> Acesso em 8 de abril de 2016.

GAGE, M. **Architecture that Challenges your Concept of Reality**. TEDxMidAtlantic Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=7v5hmQt57lc> Acesso em 14 de dezembro de 2017.

GANNON, Madeline. **The Shape of Touch: On-Body Interfaces for Digital Design and Fabrication**. Architectural Design, v. 87, n. 6, p. 114-119, 2017.

GARDINER, J. **Exploring the emerging design territory of construction 3D printing**. project led architectural research. School of Architecture and Design, RMIT University, Melbourne, Australia, 2011.

GIBSON, Ian; ROSEN, David W.; STUCKER, Brent. **Design for additive manufacturing**. In: Additive Manufacturing Technologies. Springer, Boston, MA, 2010. p. 299-332.

GILPIN, L. **The dark side of 3D printing: 10 things to watch**. Disponível em: <http://www.techrepublic.com/article/the-dark-side-of-3d-printing-10-things-to-watch/> , 2014. Acesso em 02 agosto de 2016.

- GLAESER, L. **The work of Frei Otto**, The Museum of Modern Art, New York, 1972.
- GOULD, S. J. **The structure of evolutionary theory**. Cambridge: Harvard University Press, 2002.
- GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias; WILLMANN, Jan. **The robotic touch: How robots change architecture: Gramazio & Kohler Research ETH Zurich 2005-2013**. Park Books, 2014.
- GROTE, K. et al. **Die PEP-begleitenden Prozesse**. In: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Springer Berlin Heidelberg, p. 25-236, 2013.
- HAGUE, R; MANSOUR, S; SALEH, N. **Design opportunities with rapid manufacturing**. Assembly Automation, v. 23, n. 4, p. 346-356, 2003.
- HANSMEYER, Michael. TEDGlobal 2012 **Building unimaginable shapes**. video 11:01 minutos Disponível em https://www.ted.com/talks/michael_hansmeyer_building_unimaginable_shapes Acesso em 14 de dezembro de 2017.
- HAYMOND, Laura. **Full scale Contour Crafting applications**. University of Southern California, 2008.
- HENSEL, M.; WEINSTOCK, M.; MENGES, A. **Emergence: morphogenetic design strategies**. Architectural Design, vol. 74, num. 3. Wiley-Academy, 2004.
- HENSEL, Michael; MENGES, Achim; WEINSTOCK, Michael. **Towards self-organisational and multiple-performance capacity in architecture**. Architectural design, v. 76, n. 2, p. 5-11, 2006..
- HOLLAND, John. **Adaptation in natural and artificial systems**. Cambridge: MIT Press, 1992.
- HOLLAND, N. **Inform Form Perform**, University of Nebraska-Lincoln, 2011.
- HOPKINSON, Neil; DICKENS, Phill. **Rapid prototyping for direct manufacture**. Rapid prototyping journal, v. 7, n. 4, p. 197-202, 2001.
- HOPKINSON, Neil; HAGUE, Richard; DICKENS, Philip (Ed.). **Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age**. John Wiley & Sons, 2006.
- İÇMELİ, B, M. **Digital Morphogenesis in Architectural Design**. Contemporary Discussions and Design Methodologies, 2014.
- IWAMOTO, Lisa. **Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques**, Princeton Architectural Press, New York, 2009.
- JONATHAN, Massey. **Risk Design**, The Aggregate website (Transparent Peer Reviewed) 5 November, 2013. Disponível em <http://we-aggregate.org/piece/risk-design>. Acesso em 02 fevereiro 2017.
- KHOSHNEVIS, B. 1996. **Additive fabrication apparatus and method**. USA patent application 08/382,869. June 25 1996.
- KHOSHNEVIS, B. 2004. **Automated construction by contour crafting - related robotics and information technologies**. Automation in Construction, 13, 5-19.
- KHOSHNEVIS, B. **Contour Crafting Extrusion Nozzles**. 2009.
- KHOSHNEVIS, B. **Nozzle for forming an extruded wall with rib-like interior**. U.S. Patent n. 7,874,825, 25, 2011.

- KHOSHNEVIS, B., KIM, W., TOUTANJI, H. & FISKE, M. R. **Lunar Contour Crafting - A Novel Technique for ISRU-Based Habitat Development**. American Institute of Aeronautics and Astronautics Conference. Reno, Nevada. 2005.
- KODAMA, Hideo. **Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer**. Review of scientific instruments, v. 52, n. 11, p. 1770-1773, 1981.
- KOLAREVIC, Branko. **Designing and manufacturing architecture in the digital age**. Architectural information management, p. 2001117-123, 2001.
- KOLAREVIC, Branko. **Digital morphogenesis: Architecture in the Digital Age**, Design and Manufacturing. London, New York: Spon Press, p. 26, 2003.
- KWON, Hongkyu. **Experimentation and analysis of contour crafting (CC) process using uncured ceramic materials**. 2002. Tese de Doutorado. University of Southern California.
- LAARMAN, JORIS, et al. **ANTI-GRAVITY ADDITIVE MANUFACTURING**. Fabricate 2014: Negotiating Design & Making, DGO - Digital original ed., UCL Press, London, 2017, pp. 192–197. JSTOR.
- LABONNOTE, N.; RØNNQUIST, A.; MANUM, B.; & RÜTHER, P. 2016. **Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities**. Automation in Construction, 72, 347-366.
- LE, T. T.; AUSTIN, S. A.; LIM, S.; BUSWELL R. A.; GIBB, A. G.; & THORPE, T. 2012. **Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete**. Materials and structures, 45(8), 1221-1232.
- LEACH, Neil. Size Matters: **Why Architecture is the Future of 3D Printing**. Architectural Design, v. 87, n. 6, p. 76-83, 2017.
- LIM, S., BUSWELL, R.A., LE, T.T., AUSTIN, S.A., GIBB, A.G.F. and THORPE, T., 2012. **Developments in construction-scale additive manufacturing processes**. Automation in Construction, 21 (1), pp. 262-268.
- LINDSEY, Bruce; GEHRY, **Frank O. Digital Gehry**. Englische Ausgabe.: Material Resistance Digital Construction. Springer Science & Business Media, 2001.
- LIPSON, H; KURMAN, M. Fabricated: **The new world of 3D printing**. John Wiley & Sons, 2013.
- LYNN, Greg, **Animate Form**, 1999 Princeton Architectural Press, New York ISBN: 978-1568980836.
- LYNN, Greg. **Organic algorithms in architecture**. TED2005, Disponível em https://www.ted.com/talks/greg_lynn_on_organic_design/discussion?nolanguage=ptbr Acesso em 14 de dezembro de 2017.
- MASSEY, Jonathan. **The Gherkin: How London's Famous Tower Leveraged Risk and Became an Icon**. 05 Nov 2013. ArchDaily. Disponível em <https://www.archdaily.com/445413/the-gherkin-how-london-s-famous-tower-leveraged-risk-and-became-an-icon/> Acesso em 12 de novembro de 2017.
- MENGES, Achim. **Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational**. John Wiley & Sons, 2015.
- MIGAYROU, F; MENNAN, Z, **Non standard architectures**, Editions du Centre Pompidou, Paris, 2003.
- MITCHELL, W. **Constructing complexity**, in Proceedings of the Tenth, 2005 International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures, Vienna, Austria pp 41e50.

MOREIRA, D. C.; PETRECHE, J.R.D.; FABRICIO, M.M (orgs). **O processo de projeto em Arquitetura: da teoria à tecnologia**. São Paulo, Oficina de Textos, 2011.

MUSLIU, Nysret, **Genetic Algorithms: A Tutorial.**, Associate Professor Database and Artificial Intelligence Group, Vienna University of Technology.

NASCIMENTO, Anelise V. **Fronteiras permeáveis entre a arquitetura e a biologia – processos de projeto digital**. Dissertação (mestrado em Arquitetura) Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

NIRAULA, Nobal. **Genetic Algorithms**, University of Memphis, Nov 11, 2010.

NOGUEIRA, Fabio, **Entre algoritmos e afetos: a arquitetura, o espaço e o digital**. Dissertação de mestrado em arquitetura e urbanismo – FAU - UFAL, 2016.

NOGUEIRA, Fabio, **Experimentação Projetual: Exercício Utilizando Sistemas Generativos E Desenho Paramétrico**, Trabalho final de graduação, FAU - UFAL, 2013.

OHNO, Taiichi. **Toyota production system: beyond large-scale production**. crc Press, 1988.

OXMAN, Neri. **Material Computation**, John Wiley & Sons Ltd, 2012.

OXMAN, Neri. **Design at the intersection of technology and biology**. 2015, TED2015, Disponível em https://www.ted.com/talks/neri_oxman_design_at_the_intersection_of_technology_and_biology/discussion. Acesso em 8 nov. 2016.

OXMAN, Rivka. (Org.); OXMAN, C, R. (Org.). **New Structuralism: design, engineering and architectural technologies**, John Wiley, Architectural Design, 80: 1–4. doi: 10.1002/ad.1097 ISBN 9780470742273, 2010.

OXMAN, Rivka. **Morphogenesis in the Theory and Methodology of Digital Tectonics**. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures. Vol. 51, No. 3 September n. 165, pp. 95-205, 2010.

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

OXMAN, Rivka. **Performance-based design: current practices and research issues**. International journal of architectural computing, v. 6, n. 1, p. 1-17, 2008. Technion, Israel Institute of Technology Haifa, Israel 32000.

PAWLYN, M. **Using nature's genius in architecture**. TEDSalon London 2010, Disponível em https://www.ted.com/talks/michael_pawlyn_using_nature_s_genius_in_architecture Acesso em 8 nov. 2016.

PEGNA, J. **Exploratory investigation of layered fabrication applied to construction automation**. ASME Design Automation. Boston, Massachusetts, USA, 1995.

PEGNA, Joseph. **Exploratory investigation of layered fabrication applied to construction automation**. In: Proceedings of ASME Design Automation Conference, Boston, Ma.(Sept. 17-20, 1995). 1995.

PEIGL Les Piegl, **On NURBS: A Survey**, Jan 01, 1991, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 11, No. 1, pp. 55 – 71.

PETERS, Brian. **Building Bytes: 3D-Printed Bricks**. ACADIA 13: Adaptive Architecture [Proceedings of the 33rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), 2013.

PICON, A. **Arquitetura e o virtual: Rumo a uma nova materialidade O campo ampliado da arquitetura: Antologia teórica 1993-2009**, vários autores; A Krista Sykes (org.) 2004

RAEL, Ronald; SAN FRATELLO, Virginia. **Clay Bodies: Crafting the Future with 3D Printing**. Architectural Design, v. 87, n. 6, p. 92-97, 2017.

REDWOOD, B., SCHÖFFER, F., GARRET, B., **The 3D Printing Handbook - Technologies, Design and Applications**, Coers&Roest© 3D Hubs B.V., 2017.

RELVAS, C. **Controlo Numérico Computadorizado: Conceitos Fundamentais (3ª Edição)** (Porto: Publindústria). ISBN 9789728953980, 2012.

RIVERA, Andreas. **The State of 3D Printing in 2017** Disponível em <https://www.businessnewsdaily.com/10309-state-of-3d-printing-industry.html>, 2017 Acesso em 10 julho de 2016.

ROGERS David F. Rogers, EARNSHAW Rae A. (editors), **State of the Art in Computer Graphics - Visualization and Modeling**, 1991, New York, Springer-Verlag, pp. 225 – 269.

ROPER, C. S., SCHUBERT, R. C., MALONEY, K. J., PAGE, D., RO, C. J., YANG, S. S., & JACOBSEN, A. J. **Scalable 3D bicontinuous fluid networks: Polymer heat exchangers toward artificial organs**. Advanced Materials, 27(15), 2479-2484., 2015.

RUDENKO, Andrey. **Concrete 3D Castle completed**. Disponível em: <http://www.totalkustom.com/> acesso em 2 de fevereiro de 2014.

RUDENKO, Andrey. **World's First 3D Printed Hotel Suite in the Philippines**. Disponível em: <http://www.totalkustom.com/> acessado em 2 de fevereiro de 2015.

SABIN, J, E. MILLER, M. CASSAB, N. ANDREW, L. **PolyBrick: Variegated Additive Ceramic Component Manufacturing (ACCM) 3D Printing and Additive Manufacturing**. 1(2): 78-84. doi:10.1089/3dp.2014.0012, 2014.

SACHS, Emanuel M. et al. **Three-dimensional printing techniques**. U.S. Patent n. 5,204,055, 20 abr. 1993.

SCHUMACHER, Patrik, **In Defense of Parametricism**. Published by Machine Books, in series: “Styles: In Defense of ...”, series editor: Austin Williams London 2015.

SCHUMACHER, Patrik. **Tectonism in Architecture, Design and Fashion: Innovations in Digital Fabrication as Stylistic Drivers**. Architectural Design, v. 87, n. 6, p. 106-113, 2017.

SCHUMACHER, Patrik; ZHENG Lei, **From Typology to Topology: Social, Spatial, and Structural** Published in: Architectural Journal, London 2017, No. 590, 2017/11, Source journal for Chinese scientific and technical papers and citations; Sponsor: The Architectural Society of China, Chief editor: Cui Kai.

SHEA, Kristina; AISH, Robert; GOURTOVAIA, Marina. **Towards integrated performance-based generative design tools**. In: eCAADe 03, 21st Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe, Graz, Graz University of Technology. 2003. p. 553-560.

SKETCHES of Frank Gehry, 2006, filme documentário, Estados Unidos, 1h 23min Direção: Sydney Pollack, Produção: Ultan Guilfoyle.

SPERLING, D. M., HERRERA Polo, P. C., CELANI, G., & SCHEEREN, R. **Fabricação digital na América do Sul: um mapeamento de linhas de ação a partir da arquitetura e urbanismo**. Blucher Design Proceedings, 2015.

SPILLER, Neil. **Surrealistic exuberance—dark matters**. Architectural Design, v. 80, n. 2, p. 64-69, 2010.

STANISLAV R, **Towards Morphogenesis in Architecture**, University of Melbourne, International Journal of Architectural Computing, 7 (3), pp. 345 – 374, 2009.

STRAUSS, Holger. **AM Envelope: The Potential of Additive Manufacturing for facade constructions**. TU Delft, 2013.

TOLEDO, Alexandre Márcio. **Arquitetura digital e modelos de geração da forma: representação, concepção e produção da arquitetura contemporânea**, Ímpeto n.6, Edufal, 2016.

VAN DER ZEE, A.; MARIJNISSEN, Marjolein. **3D concrete printing in architecture: a research on the potential benefits of 3D Printing in Architecture**. In: 35st International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (35st eCAADe), September 20-22, 2017, Rome, Italy. 2017.

VENTOLA, C. Lee. **Medical applications for 3D printing: current and projected uses**. Pharmacy and Therapeutics, v. 39, n. 10, p. 704, 2014.

WEINSTOCK, M. **Self-Organization and the Structural Dynamics of Plants**. Architectural Design, vol. 76, num. 2, pp. 60-69. Wiley-Academy, 2006.

WEINSTOCK, M. **The Architecture of Emergence: The Evolution of Form in Nature and Civilization**. Wiley, 2010.

WILLIAMS II, Robert L.; ALBUS, James S.; BOSTELMAN, Roger V. **Self-contained automated construction deposition system**. *Automation in Construction*, v. 13, n. 3, p. 393-407, 2004.

WILLIS, Bryce R. **Digital morphogenesis: a computational housing typology**. 2012. University of Nebraska-Lincoln, 2012.

WOHLERS, T. 2007. **Viewpoint: Confused by terminology? Time compression Technologies**. Disponível em: www.wohlersassociates.com/MarApr07TCT.htm Acesso em 12 de maio de 2016.

WOHLERS, Terry. **Report 2010: Additive Manufacturing state of the industry annual worldwide progress report**. Fort Collins, CO: Wohlers Associates, 2010.

WOOTEN, John. **Aeronautical case studies using rapid manufacture**. Rapid Manufacturing-An Industrial Revolution for the Digital Age, Weinheim, Wiley Verlag, p. 233-239, 2006.

YOSHIDA, Hironori et al. **Architecture-scale human-assisted additive manufacturing**. ACM Transactions on Graphics (TOG), v. 34, n. 4, p. 88, 2015.

ZARITSKY, Assaf. **Introduction to Genetic Algorithms**, Ben-Gurion University, Israel Disponível em www.cs.bgu.ac.il/~assafza. Acesso em 01 fevereiro 2017.

ZOU, R. et al. **Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material**. Composites Part B: Engineering, 2016.

Apêndice 01 - O arquiteto e a tectônica

O termo “tectônica”, derivado do grego *tekton* que significa carpinteiro, possuiu noções diversas ao longo de 2000 anos. Comumente definida como “arte da construção”, a sua compreensão se modificou pelas contribuições de Gottfried Semper no século 19, e principalmente por Kenneth Frampton que compreende o termo como o “potencial de expressão construtiva” da arquitetura, ao unir conhecimentos materiais e construtivos a pontos culturais e estéticos (AMARAL, 2009).

Segundo Amaral (2009), o conceito de tectônica da Antiguidade clássica ainda necessita de uma reconstituição. A autora considera que o termo ganha autonomia, abandonando uma relação direta com a arquitetura no século 18, com uma nova compreensão da física da construção que emerge com as ciências do cálculo, no mesmo momento em que acontece a divisão dos papéis de arquitetos e engenheiros.

As possibilidades do cálculo, do projeto com desenho técnico e o advento da perspectiva modificam a relação do arquiteto com a materialização do edifício. Pressupõe-se aqui que o uso da impressão 3D aproxima o arquiteto contemporâneo de uma consciência construtiva na arquitetura. Há exemplos de arquitetos que decidem executar os edifícios de modo independente. Faz-se uma análise histórica através de uma ilustração sobre a linha do tempo, pontuando os eventos que influenciam a aproximação ou o afastamento do arquiteto da habilidade de construir. É dada atenção especial ao surgimento da tecnologia CAD/CAM.

Tendo início conjunto, a tecnologia CAD/CAM³² nos anos 60 era, em princípio, uma tecnologia única e indissociável. No entanto, somente o uso de ferramentas CAD foi amplamente adotado pelos profissionais de arquitetura. Isso talvez se deva ao acesso fácil de um software CAD, comparado a um hardware CAM, que é em geral grande e caro.

CAD/CAM e sua aparente guinada por caminhos diferentes, favoreceram a ideia de que diversos softwares surgiram com a finalidade de concepção e visualização arquitetônica, mas com pouca ou nenhuma interação com processos CAM. Enquanto que softwares de sólidos, como são conhecidos, os programas dedicados exclusivamente à fabricação digital ficaram distantes da rotina do arquiteto.

³² “Computer-Aided Design”, “Computer-Aided Manufacturing”

Esse distanciamento começa a diminuir com o surgimento de projetos de alto custo, com o uso de tecnologia de ponta e com o subsídio de grandes escritórios internacionais nos anos 90.

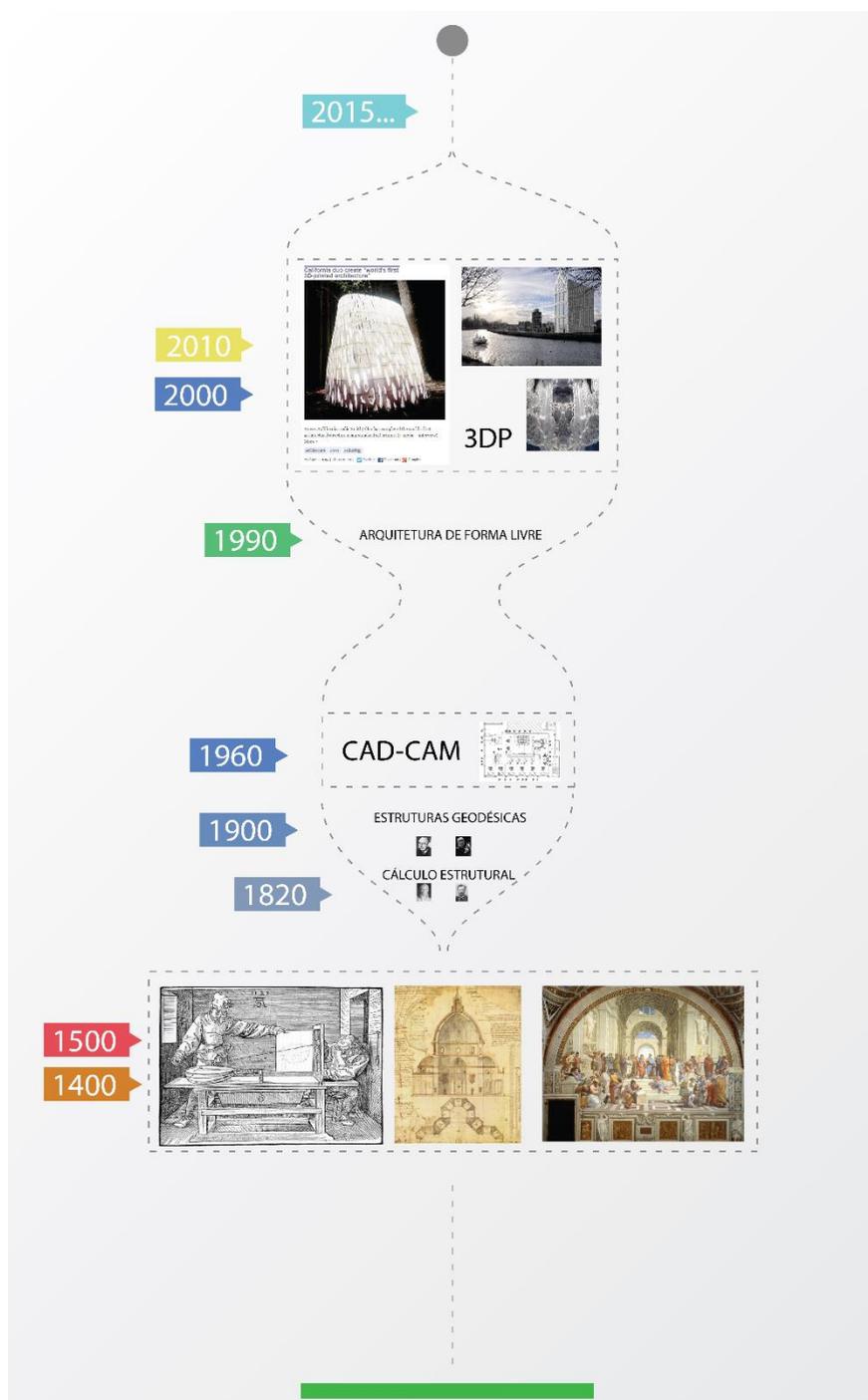


Figura 135 - Linha do tempo da relação do arquiteto com a tectônica (SILVA, 2018)

Como estímulo à fabricação digital, está também a complexidade geométrica decorrente do uso de softwares avançados CAD e BIM. O arquiteto Frank Gehry esteve sempre presente no aspecto prático desse conceito de projeto, com seu escritório trabalhando inclusive no desenvolvimento de softwares.

Com o surgimento de softwares cada vez mais versáteis, houve também um rompimento nas fronteiras das profissões. Softwares da indústria cinematográfica passaram a ser usados na visualização de imagens de edifícios ultrarrealistas e experimentos com softwares de outras indústrias, na intenção de geração de projetos (GREG LYNN, 2001).

O uso de ferramentas industriais foi então novamente pensado para a arquitetura, através de uma parcela pequena e de alto custo, mas que vem se popularizando na medida que o preço dos equipamentos se torna mais acessível.

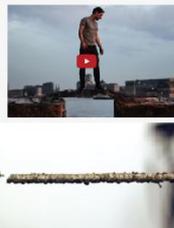
O que ocorre com a impressão 3D é que, principalmente após a queda da patente, se enxergam-se as possibilidades de uma nova união, aparentemente definitiva entre CAD e CAM, dessa vez acessível a toda classe de arquitetos.

Apêndice 02 – Ilustração: Linha do tempo Arquitetura e impressão 3D

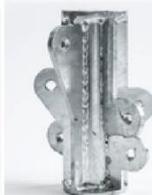
2015



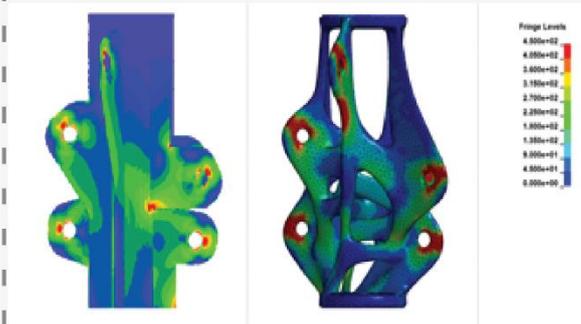
MX3D
Ponte
em aço
Junho



2014



ARUP
Conexão de módulo
Aço
Junho



2014



Win sun
China
Material de construção
reciclado
Menos de \$5.000
Abril

2014



Andrey Rudenko
EUA
1x3 cm
50 cm/dia
Janeiro

2013



News: British architect Adrian Priestman claims to have designed and installed the first 3D-printed components to be approved for use in the construction industry.

Dezembro
Primeira peça
usada na construção

2013



Michael Hansmeyer e
Benjamin Dillenburger
Digital Grottesque
Primeiro comodo
impresso
Gerado por algoritmo
Julho

2013



News: California studio Smith|Allen has completed the world's first architectural structure using standard 3D printers (+ movie + interview).
More >
Architecture News Technology
21 August 2013 | 28 comments | Twitter | Facebook | Google+

California studio Smith|Allen
585 peças
10.800 horas de impressão
Montagem em 1 dia

2013



DUS Architects
Canal House
Amsterdam
Março

2013



Landscape House
Universe Architecture
D-Shape
Janeiro

2012



Arquiteto Brian Peters
Adaptou uma impressora 3D
de desktop
Ceramica
Holanda



2012



London-based architecture
collective Softkill Design
Proto-house

2009



Radiolaria de Andrea Morgante
Por D-Shape
CAD-CAM
24 horas para curar