

**Universidade de São Paulo**

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAUUSP

Programa de Pós Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – PPGFAU

Departamento de Tecnologia em Arquitetura e Urbanismo

**Ciclo de desenvolvimento de projeto baseado em desempenho do  
material: dos processos digitalmente mediados à fabricação local**

São Paulo, 07 de Março de 2019

**Universidade de São Paulo**

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAUUSP

Programa de Pós Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – PPGFAU

Departamento de Tecnologia em Arquitetura e Urbanismo

**Ciclo de desenvolvimento de projeto baseado em desempenho do material: dos processos digitalmente mediados à fabricação local**

Acadêmico: Thiago Henrique Omena

Orientador: Prof. Dr. Arthur Hunold Lara

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Claudia T. A. Oliveira

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, como requisito para obtenção do título de **Doutor** em Arquitetura e Urbanismo.

São Paulo, 07 de Março de 2019

À energia maior que nos governa;  
à dona Terezinha, pelos vinhos, risadas e pela crença  
irrevogável e irrefutável nos sonhos do seu neto e;  
à todos meus irmãos, como forma de incentivo à  
educação (que a mim foi dado por meus pais).

## Agradecimentos

A jornada pelo doutorado passa por um longo caminho de aprendizado e autoconhecimento, o qual agradeço muito ao universo, à Deus e às diversas pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para sua concretização.

Neste sentido, agradeço a professora Claudia Terezinha, que foi quem me concedeu a oportunidade já na fase de seleção, e cujas contribuições, após tornar-se minha coorientadora, foram sempre precisas e elucidativas.

Aos professores Alessandra Prata, Leonardo Monteiro e Joana Carla Gonçalves que me ajudaram a compreender '*the analysis beyond the number*', uma vez que minha mente, tão enraizada no método cartesiano do mestrado em engenharia civil, tinha dificuldade em aceitar a confiabilidade dos resultados das respostas térmicas dos usuários (mesmo eu sendo um deles). Compreender a relevância desta "análise", foi também, compreender-me enquanto pessoa, além de pesquisador científico.

Aos professores Júlio Katinsky, Denise e Luiz Munari por auxiliarem no estudo daquilo que viria a ser transformador no meu processo histórico: Teoria do conhecimento, este é o nome que acredito que deveria ter a disciplina que foi ministrada por eles; mas, quis o universo (e o colegiado da Pós) que ela se chamasse Metodologia aplicada à arquitetura e ao urbanismo. Não estudamos o objeto, estudávamos o sujeito, foi este o momento em que descobri que a verdade possui dependência com a análise reflexiva que, por sua vez, baseia-se na percepção individual. Como desdobramento deste pensamento pude perceber que as pessoas discutem, primeiro por definirem conceitos diferentes para a mesma palavra (duas pessoas podem ter significados diferentes para o mesmo vocábulo, o que não é tão incomum quanto parece) e segundo, porque possuem modos diferentes de se relacionar/entender estas palavras.

Depois dessa disciplina, nunca mais discuti novamente (risos), pois como disse uma vez David Hume: "você não pode usar os casos observados, para explicar, com 100% de certeza, os casos observáveis". Não há como saber, apenas podemos encontrar indícios. Deste modo, posso estar certo, como posso estar errado, por isso, sou e somos todos, apenas um grão na arguição científica que pode durar eternamente, até porque, uma verdade científica é verdade até que alguém prove o contrário (e quantos contrários já não foram provados ...).

Agradeço aos amigos da Pós, sempre prontos a ajudar, em especial ao Jeferson Bunder, com quem discuti e discuto vários aspectos que permeiam física e metafísica, até porque, fé é justamente aquilo em que acreditamos e não podemos comprovar. De modo especial deixo meu carinho aos pais

dele também, pessoas maravilhosas que tive o prazer de me relacionar, e seu pai (*in memoriam*), que aos 84 anos, quando o conheci, dava um banho de saúde e jovialidade em muitos jovens como eu. Esteja onde estiver, gratidão seu Mario Bunder.

Este trabalho não teria sido o mesmo se não existisse o nosso grupo de pesquisa, que foi se formando ao logo do doutorado. Agradeço assim, o auxílio do Engenheiro, investigador e curioso nato Fernando Palermo Simões, que me ajudou a compreender a importância da relação entre geometria diferencial e a arquitetura oriunda de raciocínio matemático, fato este que acredito ser importantíssimo para o arquiteto do futuro. Gratidão amigo, que nosso grupo continue durante um bom tempo.

Aos acadêmicos de engenharia e Arquitetura da USP: Marcio Sartorelli, Daniel Locatelli (graduação), Isabel Moreira, Alfredo Haydamus (mestrado) e Jair de Oliveira (doutorado), gentis e detentores de conhecimento ímpar, que auxiliaram em todas as pesquisas e transformaram a construção do conhecimento em algo leve através dos encontros do nosso grupo de pesquisa.

Agradeço também ao meu Orientador, professor Arthur Lara, que me devolveu, depois de anos na arquitetura, a paixão pela investigação de geometrias não Euclidianas, além de me mostrar que é possível aliar, com tranquilidade e leveza, vida pessoal e profissional. Sendo assim, uma grande saudação à sua família e, longa vida ao veleiro batatinha (outro membro familiar).

À professora Gabriela Celani, que gentilmente participou da qualificação e que, depois dela, deu-me imenso suporte na elucidação dos assuntos discutidos na tese, agradeço de coração todos os e-mails respondidos, a sua participação com toda a certeza ajudou a delimitar e catalisar o trabalho. Ela e meu orientador me apresentaram um campo de estudos que quero continuar trilhando: *Digital Design and Research*.

Agradeço à UFT, por ter me dado a oportunidade de me afastar nos dois últimos anos. Agradeço também à CAPES por disponibilizar uma bolsa Pró-Doutoral nos últimos seis meses de doutorado. Agradeço ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) pela realização dos ensaios de caracterização do compósito de fibra de carbono e resina epóxi produzido ao final da pesquisa, parcerias acadêmicas como esta é que alavancam a Pós-Graduação e a ciência nacional.

Por último, estando em um doutorado público, eu não poderia deixar de agradecer à população brasileira, financiadora dos meus estudos. Sou a prova viva de que a educação pública, de qualidade, pode ser um gigantesco fator de mudança social. Que eu possa devolver a confiança depositada em mim, com o meu trabalho egresso: Que venha a construção do Pequilab Tocantins! Ainda um sonho, mas como diz o poeta: sonho que senha junto, torna-se realidade.

.À todos, uma imensa gratidão deste, que se considera um eterno aprendiz

## Resumo

Considerando a necessidade de adaptar, para mão de obra local e não especializada, os dois ciclos de desenvolvimento de projeto baseado em desempenho do material, objetiva-se comparar processos de projeto de modelos *form-making*, algorítmico e *form-finding*, com morfologias de curvatura  $C^2$ , e assim avaliar seus desempenhos estruturais; produzir um material compósito polimérico com fibra natural e, por último, generalizar um ciclo de desenvolvimento de projeto que englobe fabricação com materiais compósitos de morfologias oriundas de processos digitais de projeto. Para tanto, procede-se à uma abordagem de pesquisa orientada por projeto conhecida como *design research*, além metodologia exploratória, experimental, descritiva e de aplicação. Desse modo observou-se que os modelos de formação baseada em desempenho simulados apresentaram resultados menores na deformação máxima e energia elástica de deformação que resultam em estruturas otimizadas que necessitam de menos material para serem produzidas. Isto permitiu concluir que o ciclo de desenvolvimento de projeto proposto pela pesquisa é capaz de viabilizar formas não convencionais geradas por processos digitais de projeto e fabricadas com materiais compósitos poliméricos.

**Palavras Chave:** Ciclo de desenvolvimento de projeto, desempenho material, processo digital de projeto, materiais compósitos poliméricos.

## **Abstract**

*Considering the need to adapt, for local and non-specialized hand labor, the design development cycle based on material performance, this thesis aims to compare design methods of  $C^2$  curvature morphologies, through form-making, algorithmic and form-finding models, and thus to evaluate their structural performances; to produce a polymeric composite material with natural fiber and; at last, to generalize a design development cycle that encompasses fabrication with composite materials of morphologies originated by digital design. In this sense, the study relied on a design driven research approach, known as design research, in addition to an exploratory, application, descriptive and experimental methodology. In this way, it was observed that, the simulated performance-based models presented lower results in the maximum deformation and elastic energy of deformation that resulted in optimized structures that requires less material to be produced. This allowed to conclude, that the design development cycle proposed by this research is capable of enabling non-conventional forms generated by digital design and fabricated with polymer composites.*

**Keywords:** *Design development cycle, material performance, digital design, polymer composite materials.*

*The parameters and their interrelationships become [...] the code of the new architectural language [...]. The setting of parameters and their relations must be supported by the techniques and tools offered by the most current sciences, in particular by logics, mathematics [...] and computers.*

Luigi Moretti, arquiteto que, em 1939, definiu a expressão italiana “*architettura Parametrica*”.

# Sumário

<b>Capítulo 1: Introdução</b>	<b>11</b>
<b>Capítulo 2: Processo de projeto</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b> Processo de projeto e método científico	<b>25</b>
<b>2.1.1</b> Abordagem histórica do processo de projeto	<b>28</b>
<b>2.1.2</b> As fases do processo de projeto	<b>33</b>
<b>2.1.3</b> Processo de projeto no Brasil	<b>37</b>
<b>2.2</b> Processo digital de projeto	<b>41</b>
<b>2.2.1</b> A mudança na mediação	<b>42</b>
<b>2.2.2</b> As mudanças paradigmáticas na representação	<b>46</b>
<b>2.2.3</b> O processo digital e o Novo Estruturalismo	<b>48</b>
<b>2.2.4</b> Tectônica Digital	<b>53</b>
<b>2.2.5</b> Os modelos de representação na Arquitetura	<b>55</b>
<b>2.2.6</b> Os modelos de processos digitais de projeto	<b>61</b>
<b>2.2.7</b> A mudança na lógica do processo de projeto	<b>74</b>
<b>Capítulo 3: Ferramentas digitais como parte do processo</b>	<b>80</b>
<b>3.1</b> Entidades de Modelagem	<b>80</b>
<b>3.1.1</b> <i>Spline</i>	<b>81</b>
<b>3.1.2</b> O algoritmo de Casteljau e a curva Bézier	<b>84</b>
<b>3.1.3</b> <i>B-splines</i> e o processo da General Motors (GM)	<b>89</b>
<b>3.1.4</b> As cônicas de Liming	<b>91</b>
<b>3.1.5</b> Superfícies Paramétricas	<b>94</b>
<b>3.1.6</b> CSG e <i>B-Rep</i>	<b>96</b>

3.1.7 NURBS	100
3.1.8 <i>T-splines</i>	104
3.2 Otimização Topológica	108
<b>Capítulo 4: Fabricação e arquitetura</b>	<b>117</b>
4.1 A primeira revolução industrial	118
4.2 A segunda revolução industrial	120
4.3 A terceira revolução industrial	127
4.4 A quarta revolução industrial	135
4.5 Regionalismo paramétrico ou processo <i>High-Low</i> : um caminho possível entre a a arquitetura paramétrica e a fabricação local	146
<b>Capítulo 5: Procedimentos metodológicos</b>	<b>156</b>
5.1 Abordagens em pesquisas orientadas por projetos	156
5.1.1 <i>Design Research</i>	158
5.2 Equipamentos e materiais utilizados	161
<b>Capítulo 6: Exemplos e investigações</b>	<b>166</b>
6.1 Abordagem aos processos de projeto e de fabricação	166
6.2 Refinamento do processo de fabricação	193
6.3 Abordagem ao processo de projeto: Desafio SAMPE 2017	204
6.4 Aperfeiçoamento do processo de projeto: Desafio SAMPE 2018	217
<b>Capítulo 7: Crítica à razão projetiva</b>	<b>237</b>

7.1 Os processos digitais de projeto, como o AAD, desmerecem os processos clássicos, como os que se iniciam pelo o croqui?	237
7.2 Os arquitetos devem ser programadores no futuro?	239
7.3 Crítica ao uso das novas ferramentas digitais	247
<b>Considerações finais</b>	<b>252</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>255</b>



Tome uma forma, qualquer que seja, qualquer algoritmo articulável numericamente. Introduza essa forma, por meio de um computador [...]. Preencha tanto quanto possível essa forma (que se fez visível deste modo) com partículas. E então observe: mundos surgirão.

Vilém Flusser

## Capítulo 1 - Introdução

Em tempos de concepção e produção digitalmente mediados, torna-se relevante a necessidade de pesquisas sobre ciclos de desenvolvimento de projeto, aqui definido como os processos que acontecem durante as fases de projeto, fabricação e validação por protótipos.

Considerando a dificuldade, em virtude de mão de obra não especializada, em construir formas não convencionais, torna-se igualmente necessária a criação de fluxos de procedimentos de fabricação capazes de traduzir, à estas mãos de obra, as possibilidades formais da fabricação digital atrelada à arquitetura e às revoluções da indústria.

Ante o exposto, é de extrema relevância que sejam transmitidos aos acadêmicos e profissionais que trabalham com concepção arquitetônica a ideia de que os dados advindos do desempenho material podem ser informações essenciais, já nas fases iniciais da concepção arquitetônica.

Isto posto, os processos de projeto são estudados pela comunidade científica desde 1960 e formaram um campo de estudo que possibilitou a compreensão e sistematização do ato projetivo. Foi este o período em que houve um crescente interesse na metodologia do projeto, que, segundo Lawson (2011), era desafiado pelas novas demandas sociais, culturais e tecnológicas, além da necessidade de tornar a própria área mais sistemática e científica (diminuindo assim o foco na tentativa, erro e intuição).

Para dialogar com as questões que ascendiam desta discussão surgiram duas ramificações principais de processos de projeto: uma estratégia clássica focada na solução

do problema, conhecida como (*solution-focused strategy*), e uma estratégia que trabalhava o processo de projeto arquitetônico por meio da compreensão do problema (*problem-focused strategy*), esta última ficou conhecida como a abordagem científica ao projeto.

Foi com o surgimento da computação, e a democratização do uso dos computadores de baixo custo em 1960, que o ambiente digital passou a ser utilizado com o intuito de otimizar a representação e o processo de produção projetual. Neste momento os computadores ainda eram empregados como uma espécie de prancheta digital e, mais tarde, as questões que envolviam a arquitetura e o ambiente digital se concentraram na capacidade das novas tecnologias de remodelar os meios pelos quais seria possível conceber e produzir a arquitetura (MEREDITH, 2008; SGUIZZARDI, 2011).

A relativamente rápida evolução da informática, e o consequente aumento da capacidade de análise de dados, foram alguns dos fatores que permitiram que o computador passasse a participar também do processo generativo da forma, principalmente na proposição de múltiplas variáveis e gerenciamento de informações.

Surgiam assim os processos digitais de projeto (*Digital Design*)<sup>1</sup>, que permitiram que a forma fosse encontrada (*form-finding*) através das relações entre material, desempenho e estruturação, sequência esta que ficou conhecida como Novo Estruturalismo, conforme apontamentos de Rivka Oxman e Robert Oxman (2010). Esta metodologia projetiva fazia um contraponto em relação às metodologias clássicas, nas quais a forma, ideada pela mente do arquiteto, era então representada por desenho (*form-making*).

Embora o uso do computador tenha se difundido a ponto de se tornar parte do próprio processo de projeto, alguns autores enxergavam, com isso, um afastamento da

---

<sup>1</sup> Os processos digitais de projeto são mais conhecidos na literatura pela expressão inglesa *Digital Design*, a pesquisa opta pela utilização, majoritariamente, da expressão em português apresentada por Kotnik (2010), para simplificar a interpretação e assim defender a relação direta entre a expressão em português apresentada e o tema processo de projeto. Ainda neste raciocínio, a pesquisa opta também por utilizar a palavra projeto, frente à palavra *design* (referência estrangeira que também pode ser traduzida como projeto), mesmo entendendo que a área do *design* é ampla e possui assuntos específicos, que não necessariamente são abarcados pelo termo projeto. Por último, o trabalho se reserva o direito de utilizar a expressão original inglesa, quando houver possibilidade de cacofonia em virtude da repetição da expressão em português.

tectônica<sup>2</sup> em relação ao ofício, como foi o pensamento de Picon (2013, p. 206) quando afirmou que “o projeto baseado em computador parece desprezar com frequência a dimensão material da arquitetura”. O autor se referia ao ato projetivo que desconsiderava propriedades dos materiais (resistência, deformação, peso específico etc).

Este questionamento já havia sido apontado por Frampton (1995) e foi contestado pelo manifesto antitectônico<sup>3</sup> de William Mitchell (1998), considerado um dos expoentes nos estudos sobre a área.

Mitchell (2005), ao fazer referência ao modernismo industrial, argumentou que a produção de edifícios, antes materializada com o auxílio de desenhos baseados em papel, passava então a ser realizada por meio da informação digital (o autor afirmou que os edifícios eram então projetados, documentados, fabricados e montados com a ajuda de meios digitais).

Foi atento à esta discussão que Kolarevic (2003) pontuou que a relação entre a concepção e a produção foi reconfigurada radicalmente pela era digital. Esta reconfiguração possibilitou, segundo o autor, uma ligação entre o que pode ser concebido e o que pode ser construído, visto que agora os projetos eram passíveis de serem fabricados digitalmente através dos procedimentos que possuíam arquivos que iriam diretamente para a fábrica (*file to factory*) e, também, das tecnologias de produção por controle numérico computadorizado.

Para Florio (2011) a arquitetura internacional recente demonstra esta renovação no modo de construir, modo este que é amparado pela modelagem paramétrica e pela

---

<sup>2</sup> Aspectos ligados à arte da construção do edifício e às características dos materiais, maiores apontamentos sobre a temática, são apresentados no capítulo 2.

<sup>3</sup> Para Mitchell (1998) através do uso da realidade virtual para criar experiências espaciais (separadas da construção física, da tectônica), é possível experimentar visualmente qualquer tipo de composição formal arquitetônica, isto porque, neste contexto virtual, não haveria transformação de material a ser realizada, embora fosse possível, programar determinado material virtual para ter as características que se deseja, ou se comportar como um material real. Em seu manifesto, o autor refuta três dos quatro elementos defendidos como inerentes da arquitetura de acordo com Semper (1989): *earthworks*, *hearth* e *framing*. Restando deste modo, segundo Mitchell (1998), apenas uma atenuada versão do quarto elemento: uma membrana leve capaz de envolver e delimitar espaços.

fabricação digital e auxiliam os ofícios dos arquitetos e engenheiros. Dentro dessa nova estrutura abrangente, chamada por Mitchell (2005) de projeto digitalmente mediado, a arquitetura emergente, desta era digital, é caracterizada por altos níveis de complexidade.

Foi a busca pelo domínio da complexidade que levou a comunidade científica a experimentar, em 1980, uma metodologia de projeto que fosse capaz de fugir das limitações impostas pelos softwares e pela geometria plana. Assim, o algoritmo passou a auxiliar o processo de projeto, ficando conhecido como *Algorithm Aided Design (AAD)*, conforme apontamentos de Tedeschi (2014)

Neste contexto, foram o computador e o algoritmo que permitiram a viabilização de processos de projetos de geometrias não convencionais, tornando possível a criação e manipulação de novas morfologias e superfícies não euclidianas (FLORIO, 2011).

Outro ponto que deve ser ressaltado, é que nas metodologias convencionais de projeto existiam fases implícitas que, por não serem formalizadas, poderiam ser relacionadas à intuição e criatividade. Com a mediação digital dos projetos, estas fases precisaram ser definidas para então conseguirem ser implementadas no computador através de algoritmos.

É por isso que os processos digitais de projeção solicitam que o arquiteto possua, de forma clara, as razões que o levaram a uma dada solução formal. Isso se deve ao fato de que o uso da computação exige uma abordagem que explicita o conjunto de relações que definem o projeto (TERZIDIS, 2006, p. 39).

Estas relações precisam ser explícitas para que possam ser utilizadas no design paramétrico, cujo processo digital trabalha com parâmetros definidos, ou seja, permitem a especificação de entidades modelagem, relações entre os pontos de uma curva, construção de regras etc. São estes parâmetros, muitas vezes apresentados algorítmicamente, que são a essência do relacionamento entre a intenção e a resposta do projeto digitalmente mediado.

A definição da expressão arquitetura paramétrica ocorreu em 1939 pelo arquiteto italiano Luigi Moretti (TEDESCHI, 2014). Novak (1998) também explicou o termo quando

associou a capacidade de cálculo dos sistemas computacionais e o pensamento algoritmo, com o intuito de propor novas abordagens ao processo de projeto. Deste modo a ênfase do projeto não recairia sobre a representação de um elemento hipotético, mas sim sobre as relações presentes que permeiam a concepção arquitetônica através da matemática subjacente à forma.

Isto posto, Meredith (2008) afirmou que a parametrização é um termo matemático que se refere à descrição de elementos, em que a variação de um valor é capaz de modificar a solução de um problema sem, contudo, modificar a natureza do mesmo; ou seja, ao mudar o valor de um parâmetro, muda-se o resultado, entretanto a resposta ainda pertence à mesma classe explorada.

O domínio das formas não convencionais foi possível através destas novas abordagens ao processo de projeto aliadas à conhecimentos relacionados à matemática subjacente à forma como a geometria diferencial. Neste tocante, o professor Helmut Pottmman em seu livro *Architectural Geometry* defende que a geometria diferencial, por estudar as formas das curvas e superfícies, e diversas de suas propriedades, fornece aos arquitetos as ferramentas para a criação de formas geométricas complexas, porém com custo de produção otimizado, visto que a forma trabalha a favor da estrutura.

Aliada a este conceito, a geometria associativa (que entre outras coisas associa desenho à desempenho) é capaz de dar suporte à uma abordagem projetiva na qual uma série de relações de dependências podem ser definidas tectonicamente ou geometricamente. Deste modo, as variações na geometria de uma classe de estrutura podem ser geradas parametricamente através da variação gradativa nos valores dos seus componentes, conforme apontamentos de Rivka Oxman e Robert Oxman (2010).

De acordo com os autores, para auxiliar nestes processos de projeto utiliza-se a tectônica digital que é definida, por Oxman (2006), como a coincidência entre a representação geométrica da construção e o programa que as modula e trabalha sua estruturação. Assim, é através da codificação/programação paramétrica que é possível modular topologias estruturais.

Neste processo a manufatura digital (*digital crafting*) é entendida, segundo os autores, como a habilidade de produzir a programação e/ou algoritmo que opera o cerne dos modelos digitais. Para Rivka Oxman e Robert Oxman (2010) o processo que prepara o projeto para fabricação e construção depende da reinterpretação do projeto, visto que deve definir também a maneira como edificar a arquitetura.

Assim, os dados advindos da tectônica do modelo digital podem funcionar como informação para os processos de fabricação e construção dentro do ciclo de desenvolvimento de projeto, o que por consequência aproxima as áreas da arquitetura e engenharia.

Woodbury (2010), para demonstrar como arquitetos e urbanistas utilizam matemática, afirmou que os modelos CAD (convencionais ou paramétricos) utilizam proposições matemáticas. Isto pode ser observado quando se analisa por exemplo o fato de uma linha poder ser a proposição de que o segmento entre dois pontos faz parte do modelo. Ainda neste tocante, estes modelos realizam rotineiramente cálculos matemáticos em suas operações (ao colocar uma linha tangente à um círculo, especificar o centroide de um polígono etc.).

Segundo o autor a concepção arquitetônica vai além de um conjunto de proposições matemáticas, isto porque, ao utilizar intersecções circulares e tangentes, *grids*, *snaps* etc, arquitetos “constroem provas matemáticas de que os projetos assim especificados são consequentes de suas premissas básicas” (WOODBURY, 2010, p. 34), mesmo que o projetista não reconheça seu ofício desta maneira.

Para o autor, começar com um fato matemático estabelecido, e confiar nele para fazer uma construção, é um exemplo do que Woodbury (2010) chama de usar a matemática. Para ele os sistemas paramétricos são capazes de tornar a matemática ativa no processo de projeto, transformando-se, ao mesmo tempo, em meio e estratégia da concepção arquitetônica.

Woodbury (2010) aponta que novas operações geométricas aparecem lentamente nos softwares CAD<sup>4</sup>, o que deixa muitas possibilidades projetivas inexploradas. Isto porque o computador na era digital não é mais uma ferramenta<sup>5</sup>, ele é parte do processo de projeto, e como os arquitetos tendem a desenhar o que sabem construir e, constroem, o que sabem desenhar<sup>6</sup>, conforme Mitchell (2001), o lento desenvolvimento das operações digitais geométricas, por ser a mediação da intenção projetiva, pode estar relacionado com a também vagarosa assimilação dos novos mecanismos de produção industrial pela Arquitetura.

No que tange os ciclos de desenvolvimento do projeto dentro da produção ocidental, o erro é considerado um dado estatístico (alguns produtos defeituosos são aceitáveis e contabilizados como dado amostral, o processo prevê e aceita erros). Já no sistema japonês, em virtude da sua política interna de desperdício zero, por conta da devastação do país ocasionada pela Segunda Guerra Mundial, essa não é uma premissa aceitável, razão pela qual as variáveis de fabricação devem ser minimamente controladas (qualquer erro cometido é preciso ser solucionado antes que a cadeia de produção possa avançar), fato este que referenda a necessidade de pesquisas orientadas por processo de projeto.

Este controle rigoroso da cadeia de produção japonesa, não acontece na arquitetura, devido à quantidade e complexidade dos agentes e variáveis envolvidas e como tais fatores tornam vagaroso o processo de assimilação dos novos paradigmas de produção industrial.

---

<sup>4</sup> Para exemplificar isto, Woodbury (2010) afirmou que o refinamento e subdivisão da malha, utilizados para possibilitar maior controle da geometria, já eram utilizados há tempos nos sistemas de animação e começaram a aparecer, em 2009, nos programas CAD.

<sup>5</sup> Neste trabalho, o termo ferramenta refere-se aos instrumentos necessários à prática profissional. No que tange o universo da concepção arquitetônica digitalmente mediada, as ferramentas digitais estão diretamente relacionadas ao processo de projeto, por justamente serem o cerne desta metodologia projetiva; onde por vezes, elas se tornam o próprio processo. A pesquisa opta por utilizar este termo para, no capítulo 3, poder discutir isoladamente exemplos que fazem parte da essência dos processos digitais de projeto.

<sup>6</sup> A frase original no trabalho de Mitchell (2001) é: *architects tend to draw what they can build and build what they can draw.*

Neste tocante, enquanto as indústrias aeronáutica e automotiva já contam com fabricação alinhada à indústria 4.0, a arquitetura ainda utiliza técnicas ligadas ao terceiro paradigma de produção da indústria (customização em massa), e faz isso através da materialização proporcionada pela fabricação digital e a produção digitalmente mediada.

Diante desta contextualização é possível perceber que os ciclos de desenvolvimento do projeto precisam ser enxutos e precisos, além de preverem as possíveis problemáticas que podem advir dos processos de projeto e de fabricação. Devido a isso, as pesquisas científicas relacionadas à área utilizam abordagens orientadas por projetos, nas quais o *Design Research* (metodologia utilizada pelo presente trabalho) descreve e documenta processos de projeto, por meio de fluxogramas<sup>7</sup>, para então analisar se os mesmos atingiram os objetivos solicitados por contextos prévios.

Em ciclos de desenvolvimento de projeto, como o supracitado, ocorre primeiro a simulação da estrutura, com base em algum tipo de dado relativo ao desempenho do material, depois de pré dimensionar a estrutura é preciso fabricar uma peça com as características simuladas para que possa ser testada sua resistência. Assim, com os novos dados advindos do desempenho material, simula-se novamente a estrutura, repetindo os procedimentos até que o escopo do projeto seja alcançado.

Os ciclos de desenvolvimentos de projetos de origem conceitual, precisam ser mais rápidos, além de prever as implicações, na fabricação, das decisões de concepção. Este raciocínio não é muito diferente do processo de projeto clássico, entretanto, pode se tornar complexo, em virtude da falta de experiência da técnica de produção utilizada, conforme apontamentos de Galjaard *et al.* (2015).

Foi este o contexto em que surgiu uma necessidade de discutir a arquitetura como prática material e Kotnik (2010) também enxergou a emergência em explorar os processos

---

<sup>7</sup> A literatura que trata especificamente de pesquisa orientada por processos de projeto utiliza o termo 'esquema', como pontou Breen (2002, p. 140) quando discutiu os *symbols used in schemes of design driven research types* (símbolos utilizados em esquemas nos tipos de pesquisas orientadas por processo de projeto). O presente trabalho opta pelo uso da palavra fluxograma ou a expressão 'fluxo de procedimentos', para facilitar a compreensão do assunto em português. Ressalta-se ainda que o termo fluxograma é amplamente utilizado no design e na engenharia de software.

digitais de projeto por meio de teorias específicas e apropriadas à área. Isto porque foram as novas tecnologias digitais e a mudança na mediação arquitetônica que possibilitaram novos métodos de projeto e produção da arquitetura, que demandavam um reexame das teorias até então existentes.

Este contexto supracitado embasou a discussão do entendimento da função do material no próprio projeto, a habilidade de projetar por intermédio dele (material), além das técnicas de representação de estruturas materiais através da tectônica digital, que se configuraram em um crescente foco de pesquisa e conhecimento arquitetônico (OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert, 2010).

No que tange as tensões existentes entre as discussões globais, acerca de ciclo de desenvolvimento de projetos, e a produção local de arquiteturas paramétricas, existem teorias como o processo de fabricação *High-Low* de Lee et al. (2015), e o regionalismo paramétrico (YUAN, 2016), que entendem ser possível adaptar os novos paradigmas de fabricação industrial para a produção local ainda dependente de mão de obra não especializada.

Nestas estratégias de projetos de alta tecnologia, combinadas com metodologias locais de fabricação de baixa tecnologia (LEE et al., 2015), é preciso que os arquitetos desenvolvam e forneçam os próprios mecanismo que irão mediar a construção de arquiteturas oriundas de processos digitais de projeto.

Para Yuan (2016), à medida em que o desempenho material e as lógicas de fabricação se tornarem o foco da atenção dos arquitetos, ocorrerá uma ressignificação do ofício arquitetônico, voltando a atuar como prática ou abordagem material, como já defendia Semper em 1989.

Partindo desta explanação e ressaltando que já existem, em alguns países desenvolvidos, exemplos de processos de projetos que utilizam produção robótica e/ou com pouca dependência de mão de obra, esta pesquisa foi desenvolvida com o intuito de responder ao questionamento de como adaptar um ciclo de desenvolvimento de projeto

baseado em desempenho material para um contexto local e, portanto, ainda dependente de mão de obra não especializada?

Neste sentido a pesquisa investiga a hipótese de que o processo digital performático deve definir o material, além de aferir seu desempenho, já nas fases iniciais do ciclo de desenvolvimento do projeto. Com isso acredita-se ser possível construir, com materiais compósitos poliméricos, curvaturas com continuidade  $C^2$  (que compartilham suavidade e tangência) oriundas de processos digitais de projeto.

No que tange os paradigmas de construção da indústria, a presente pesquisa postula que as teorias de processo de fabricação *High/Low* e regionalismo paramétrico são passíveis de serem implementadas em tecnologias de produção por laminação e infusão à vácuo. Ressalta-se que as metodologias propostas pela pesquisa não necessariamente restringem-se às geometrias orgânicas, podendo também serem aplicadas à fabricação de morfologias euclidianas.

De modo geral esta pesquisa tem o objetivo de encontrar modos de adaptar para um contexto local, dependente de mão de obra não especializada, ciclos de desenvolvimento de projetos baseados em desempenho material. Isto posto, a pesquisa procurou atingir, de modo específico, os seguintes objetivos:

- Comparar processos de projeto de modelos *form-making*, algorítmico e *form-finding*.
- Avaliar o desempenho estrutural de morfologias oriundas de processos digitais de projeto;
- Produzir um material compósito polimérico com fibra natural e resina epóxi para validar seu desempenho estrutural;
- Construir, com materiais compósitos poliméricos, curvaturas de continuidade  $C^2$  (que compartilham suavidade e tangência) oriundas de processos digitais de projeto;
- Generalizar, com base nos exemplos investigados, um ciclo de desenvolvimento de projeto, que possa traduzir para mão de obra não

especializada, a fabricação com materiais compósitos de morfologias oriundas de processos digitais de projeto.

O interesse por este tema surgiu durante os trabalhos em que o autor almejava a concepção de formas não convencionais já na fase de graduação. Naquele momento, as metodologias projetivas que lhes eram conhecidas se restringiam às terminologias comuns em relação aos 12 estágios do plano de trabalho do projeto proposto pelo *Royal Institute of British Architects* — RIBA<sup>8</sup> (programa de necessidades, esboços, desenhos executivos, operações no local), além de fluxogramas, organogramas e estudo de manchas.

Após a percepção da necessidade de estudar processos digitais de projeto e a dificuldade de encontrar bibliografia referente ao tema, em português, os diversos questionamentos relacionados à temática foram formatados em uma investigação científica.

Deste modo, esta pesquisa justifica-se pela quantidade de pessoas, como era o caso do próprio autor, que ainda entram para o mercado de trabalho, sem um real conhecimento da importância dos processos de projeto clássicos e digitais, além da pouca profundidade no que tange o conhecimento da tectônica na arquitetura. Muitas vezes, sem saber da existência destes assuntos, os profissionais acabam reproduzindo soluções convencionais que o próprio mercado busca perpetuar, em virtude da facilidade e da manutenção do *status quo*. Desconhecendo, que ele próprio, pode ser um facilitador no desenvolvimento e difusão destes campos de estudo.

Outro fato relevante foi apontado por Rivka Oxman e Robert Oxman (2010) quando afirmaram que existem temas diretamente relacionados ao processo de projeto: morfogênese e tectônica digital, estruturação, materialidade e geração formal orientada pelo desempenho, temas de pesquisa sobre engenharia de projeto que são também

---

<sup>8</sup> O RIBA foi criado em 1834, na Inglaterra, e em 1965 produziu o manual de administração e prática arquitetônica, que apresentava os termos citados. Informações mais aprofundadas sobre este tema, e sobre processo de projeto são apresentadas no capítulo 2.

comuns ao arquiteto e, portanto, deveriam ser melhor exploradas pela pesquisa em processo de projeto.

Isto posto, a relevância social da pesquisa passa pela ideia de que qualquer profissional que trabalhe com concepção arquitetônica é capaz de transpor seus limites projetivos, oriundos ou não do processo de aprendizado. Assim, com auxílio de embasamento científico apropriado, ele poderá produzir uma arquitetura que além de importante para sociedade, seja também relevante para o próprio arquiteto (quando este comparar sua produção com as edificações contemporâneas).

A relevância científica desta pesquisa, permeia o fato de que os processos digitais de projeto no Brasil, ainda são temas relativamente novos e possuem arcabouços teóricos, majoritariamente, em inglês (existem alguns estudiosos sobre o tema no país, entretanto, a maioria da bibliografia é escrita em língua inglesa).

Deste modo, para que as diversas áreas correlatas que tangenciam a fabricação digital e os processos digitalmente mediados possam se difundir no ensino e na produção arquitetônica do país, é preciso que surjam cada vez mais investigações científicas nacionais que convidem os leitores (profissionais de arquitetura) a desafiar o modo como encaram o próprio ofício, através da demonstração de que é possível produzir arquitetura paramétrica num contexto local.

Em relação à organização dos capítulos da tese, a pesquisa iniciou-se a partir de delimitações das orientações que tinham como intuito avaliar um processo de projeto que se iniciasse pela escolha do material e visasse a exploração de formas não convencionais.

A primeira fase do trabalho buscou o reconhecimento do tema através de pesquisas bibliográficas que abordassem os assuntos relacionados à área, tais como processo de projeto, *digital design*, AAD, mudança na lógica do processo projetivo e nos paradigmas de representação arquitetônica, modelos de representação, tectônica digital, Novo Estruturalismo, pesquisa orientada por projeto, *Design Research*, ferramentas digitais que trabalham a matemática subjacente à forma no processo de projeto, otimização topológica, arquitetura atrelada à fabricação digital e às revoluções da indústria etc.

Em um segundo momento, foi necessário pesquisar e experimentar processos de projetos que pudessem explorar formas não convencionais, momento este em que a pesquisa começou a utilizar o método de desenho assistido por algoritmo, raciocínio topológico na geração formal, *form finding*, formação baseada em desempenho (otimização topológica), análise de elementos finitos etc. Após esta fase, procedeu-se a experimentação dos materiais onde foram realizados cursos sobre produção por compósitos e, por conseguinte, foi escolhido o compósito polimérico de fibra de carbono e resina epóxi. Este foi o material escolhido após aperfeiçoamento do ciclo de desenvolvimento do projeto, o qual também estudou, durante as investigações da pesquisa, as fibras de vidro, piaçava além de resina poliéster.

O processo de estudo dos compósitos dividiu-se em duas etapas, onde a primeira foi de aprendizado das técnicas de produções, bem como de conhecimento das características de cada material constituinte. A segunda etapa, que aconteceu na última investigação após refinamento da pesquisa, foi a caracterização do material, para aferir dados que posteriormente pudessem ser implementados no processo digital de projeto viabilizando parâmetros de análise computacional que auxiliaram a otimização topológica.

Visando a organização do trabalho, optou-se pela divisão da mesma em 7 capítulos onde o primeiro já apresentado, é composto de texto com dados introdutórios da pesquisa: problematização, hipóteses, objetivos, justificativas e organização do trabalho.

O capítulo 2, denominado **processo de projeto**, discute a busca do método no processo projetivo, bem como apresenta a história da inserção do campo de estudo no Brasil, demonstrando como as normas brasileiras possuem um enfoque racional sobre o mesmo. Este capítulo discute ainda temas inerentes aos processos de projeto digitalmente mediados, visando compreender como as novas mídias têm modificado o ato projetivo.

No capítulo 3, **ferramentas digitais**, são discutidos os elementos intrínsecos ao ato projetivo com mediação digital que impulsionam o projeto arquitetônico, especificamente as entidades de modelagem e a otimização topológica. Para compreender o

desenvolvimento destas áreas, apresenta-se a contextualização histórica da criação de cada um de seus elementos, além de demonstrar exemplos relacionando a arquitetura ao tema.

O capítulo 4 discute a **fabricação e a arquitetura**, é neste momento que são divididos os processos de produção arquitetônica relacionados às quatro revoluções da indústria, para então situar, o processo de produção da pesquisa (fabricação *High/Low* ou regionalismo paramétrico).

No capítulo 5 são discutidos os **procedimentos metodológicos** do trabalho, além de especificar os materiais utilizados e explicar as abordagens de pesquisa orientadas por projeto.

O capítulo 6 se ocupa em apresentar os **exemplos e investigações** após as abordagens teóricas da pesquisa, demonstrando a linearidade das discussões que levaram ao refinamento do ciclo de desenvolvimento de projeto.

Por último, no capítulo 7, chamado de **crítica à razão projetiva**, são apresentados alguns questionamentos que surgiram durante a pesquisa, cujas respostas refletem a análise reflexiva baseada na percepção do próprio autor, embasado pela contraposição dos elementos abordados pelo trabalho, além de fazer uma crítica ao uso irracional das ferramentas digitais.

*The designer who wants to be completely in control of the results must be in control of the process.*

*Mark Burry*

## **Capítulo 2 - Processo de projeto**

Este capítulo discute a busca por uma abordagem metodológica sobre processo de projeto, além da inserção da temática no Brasil e o enfoque racional das normas brasileiras que tratam sobre o assunto. Disserta também sobre a mudança na mediação entre o arquiteto e a edificação, a partir da introdução do computador; além das transformações paradigmáticas que ocorreram na representação arquitetônica. Aponta ainda a evolução dos modelos de representação, explica os processos digitais de projeto e, ao abordar os temas citados, contextualiza-os a partir da historicidade característica de cada um.

### **2.1 Processo de projeto e o método científico**

Para Moreira (2007) o projeto engloba o acúmulo de experiência e informação, a ação criativa, a formulação de hipóteses, a verificação das ideias, além de enfrentar desafios complexos, como a definição das atividades dos usuários e a previsão das suas implicações sociais e psicológicas. O autor relaciona o processo de projeto ao método científico quando afirma que “o projeto é visto como um procedimento que implica na formulação de hipóteses para resolver os problemas colocados e na verificação dessas hipóteses” (MOREIRA, 2007, p. 42). Isso se deve à perspectiva do autor, vez que considera que as etapas do processo de projeto são identificadas como as etapas do método científico.

Moreira (2007) afirma que no início de 1960, em atenção ao panorama científico, arquitetos e engenheiros buscaram aplicar novas técnicas ao desenvolvimento do projeto, e assim, o projeto arquitetônico e os métodos de projeto (*design methods*) foram

influenciados pelas aplicações científicas (Teoria da Informação<sup>9</sup>, Teoria dos Sistemas<sup>10</sup>, Pesquisa Operacional<sup>11</sup> e Cibernética<sup>12</sup>) visando permitir que os projetistas fossem capazes de trabalhar com grandes quantidades de informações para solucionar problemas complexos e desenvolver produtos mais eficientes. Foi nesta época que foram buscadas definições para as propriedades do projeto, o que possibilitou a troca de informações sobre o procedimento de definição dos problemas e suas soluções entre as diversas áreas de aplicações que envolviam a temática (MOREIRA, 2007).

Sobre o exposto, o autor afirma que a Pesquisa Operacional busca aplicar o método científico ao controle de sistemas organizados, e o objeto projetado passa a ser compreendido como um sistema orientado a objetivos<sup>13</sup>. Neste sentido o que orientaria a definição de cada elemento seriam as hipóteses, e isto poderia ser compreendido ao

---

<sup>9</sup> Também chamada de teoria da comunicação, estuda as propriedades que independem da interpretação da informação como ruído e redundância, conforme ECO (1997). Já a teoria matemática da informação estuda a dimensão quantitativa da mensagem, afirmando que é possível medir a informação através do método binário; no qual cada escolha de oposição binária representa uma alternativa de escolha, tais como: sim ou não, aberto ou fechado, zero ou um etc.

<sup>10</sup> Teoria que estuda uma entidade segundo as propriedades e as relações dos seus elementos ou partes, a observação de fenômenos como sistemas gerou a análise sistêmica para tomada de decisões, conforme Audi (1997). Uma das aplicações de ambas teorias em projeto, segundo Broadbent (1982), recai sobre a decisão de qual solução é a mais apropriada a ser escolhida (teoria dos sistemas) levando em consideração a probabilidade desta solução ser verdadeira. Este princípio de redução da incerteza elimina as possibilidades de escolha que foram excluídas após a transmissão da informação (escolha binária na teoria da informação).

<sup>11</sup> Refere-se à aplicação de método científico aos problemas de controle de sistemas organizados, visando orientá-los com auxílio de equipes multidisciplinares, conforme Moreira (2007). Broadbent (1982) descreve as características da pesquisa operacional aplicada ao projeto: formulação do problema, definição de um modelo matemático para cada parte, solucionar o problema através de modelo matemático síntese, verificar o desempenho em várias situações durante o projeto através dos modelos matemáticos, e definir uma linha ótima de ação.

<sup>12</sup> Segundo Moreira (2007), a cibernética utiliza conceitos das teorias da informação e dos sistemas para controlar e orientar diferentes tipos de sistemas segundo seu comportamento diante dos eventos a que está sujeito. Visando alcançar um objetivo o sistema cibernético deve possuir: uma representação interna do estado pretendido; um ciclo de realimentação (*feedback loop*), onde a informação do estado atual do sistema possa ser comparada com a representação inicial e por onde possa ser feita a correção de um erro qualquer para minimizar as diferenças; e, por último, uma dependência causal das saídas do sistema sobre o processo de correção dos erros da condição 2 (AUDI, 1997, p. 174).

<sup>13</sup> Ressalta-se a importância de não confundir a expressão sistema orientado à objetivos com modelagem orientada ao objeto e/ou linguagem orientada à objetos. Isso porque a orientação a objetos é um paradigma de análise, projeto e programação de sistemas de software baseado na composição e interação entre diversas unidades de software, chamadas de objetos. Existem autores que preferem, em alguns contextos, usar o termo modelagem orientada ao objeto, em vez de programação.

imaginar o procedimento de projeto como uma antecipação dos acontecimentos, ou seja, “o desempenho do objeto projetado é uma suposição, que deve ser baseada em dados relevantes para o problema que vai solucionar” (MOREIRA, 2007, p. 42).

Frente à possível inviabilização da descrição do contexto onde seria inserido um edifício hipotético (em virtude da expressiva quantidade de variáveis) a pesquisa operacional propõe que se trabalhe com modelos, em muitos casos matemáticos, com o intuito de simular as condições em que o projeto atuará, visto que, para Moreira (2007), seriam nestes modelos que as hipóteses de projeto seriam avaliadas. Neste sentido, os princípios do processo de projeto orientados pelas técnicas da Pesquisa Operacional são, segundo o autor:

- Descrever um conjunto de elementos que vão compor um sistema para cumprir objetivos (o projeto);
- Definir os objetivos como funções que respondem a determinados problemas;
- Levantar os dados pertinentes aos problemas, para defini-los com precisão e então dispor de informações que auxiliem sua organização e posterior solução;
- Construir um modelo do problema;
- Propor soluções para os problemas observando os dados levantados; soluções estas que devem estar relacionadas umas com as outras além de operarem juntas para compor um sistema;
- Avaliar sistemas e suas partes através do confronto com os modelos dos problemas;
- Definir o sistema, e então concluir o projeto para poder construir o objeto.

Para finalizar a compreensão deste raciocínio, Moreira (2007, p. 43) afirma que “as partes do objeto projetado estão relacionadas com o cumprimento de funções – ou desempenho -que, em caso de ineficiência ou mudança de contexto, poderiam ser alteradas para tornar o sistema novamente funcional”.

### 2.1.1 Abordagem histórica do processo de projeto

Após compreender a relação do processo de projeto com o método científico, faz-se necessário conhecer o histórico relacionado à busca metodológica ligada ao projeto. Nesta perspectiva, Slann (1963) relata que no final de 1962 foi realizada a primeira conferência sobre métodos de projeto em Londres (*Conference on Design Methods*). O intuito da referida conferência era investigar e definir métodos sistemáticos de resolução de problemas em projeto.

Este foi o primeiro momento em que se tentou reunir teorias e experiências na aplicação de técnicas sistemáticas de projeto influenciadas pelas práticas científicas já mencionadas por Bayazit, (2004); Broadbent e Ward (1971); Buchnan (1966); Cross, (1984); Kowaltowski (1992) e Moreira (2007). Três anos depois, em 1965, foi realizada, de acordo com Gregory (1966), a segunda conferência em métodos de projeto em Birmingham, e em 1967 realizou-se o congresso de métodos de projeto em arquitetura (*Design Methods in Architecture*) na cidade de Portsmouth, conforme Broadbent e Ward (1971).

Bayazit (2004) relatou que esta crescente preocupação com os métodos de projeto foi seguida por outros países, países estes que a partir de 1960 buscaram explorar o assunto por meio de seus pesquisadores e projetistas, como foi o caso da Alemanha Ocidental que publicou alguns trabalhos sobre métodos de planejamento em arquitetura.

Os principais expoentes da primeira metade da década de 1960 sobre os métodos de projeto foram, de acordo com Moreira (2007), Christopher Alexander, John Luckman e John Chris Jones. Este começou a envolver-se com métodos de projeto na década de 1950, durante o período em que trabalhou como designer industrial para um grande fabricante de produtos elétricos na Grã-Bretanha, conforme Hileman (1998).

O autor afirma que Jones ficou frustrado ao perceber que os resultados de seus estudos ergonômicos de comportamento do usuário não eram utilizados pelos designers da empresa, momento em que ele começou a estudar o processo de projeto usado pelos engenheiros. Hileman (1998) aponta que Jones descobriu que os engenheiros não possuíam

maneiras de incorporar (racionalmente) dados advindos do início do processo aos momentos em que eram mais necessários.

Esta descoberta motivou Jones a redesenhar o processo de projeto em si, com o objetivo de que a intuição e a racionalidade pudessem coexistir, ao invés de serem excludentes, raciocínio que foi o norteador de toda sua obra, conforme aponta Hileman (1998). O mesmo autor afirma que Jones, em 1970, separava as épocas do projeto em quatro eras:

Figura 1 – Divisão do projeto em eras, como Jones os via em 1970.



Fonte: Autor, 2019.

A evolução dos processos de projeto é dividida em diferentes etapas, como afirmaram Cross (1984), Bayazit (2004), Van der Voordt e Van Wegen (2005) e Moreira (2007). Para Hileman (1998) a primeira era do projeto havia caminhado um passo além do artesanato, visto que a solução à um dado problema era feita por um método que foi apelidado como caixa preta (*black box*)<sup>14</sup>. Neste método o processo não era conhecido por poucos, em alguns casos nem mesmo pelo próprio projetista que, diversas vezes, não conseguia apontar a razão por trás de uma escolha projetual, conforme pontuou Hileman (1998).

Moreira (2007) afirma que Horst Rittel defendia a primeira fase como sendo outra. Para Rittel, a primeira geração dos métodos de projeto se caracterizava por uma divisão em

<sup>14</sup> Importante ressaltar que o termo (*Black Box*) possui referência em diversas áreas (informática, engenharia de *softwares*, aviação etc), para esta pesquisa, utiliza-se a referência de Hileman (1998) já exposta, em virtude da sua relação, específica, ao processo de projeto.

três etapas baseadas na pesquisa operacional: análise, síntese e avaliação. Estas fases ficaram conhecidas como método sistemático de projeto. Nota-se que, para o autor, a primeira fase defendida por Horst Rittel se equivale à segunda era de Chris Jones.

Esta segunda era do projeto, proposta por Jones, foi motivada pelos esforços coletivos, exigidos pela Segunda Guerra Mundial, que originaram, na década de 1950, os relatórios de projetos sistemáticos em grupo. Momento em que Jones apontou, segundo afirma Hileman (1998), os métodos de *Brainstorming*; pensamento criativo em grupo; remoção de blocos mentais; e Análise de Áreas de Decisões Interligadas, ou *Analysis of Interconnected Decision Areas* (AIDA) em inglês. Nesta fase, o projeto pelo desenho passou a ser uma ferramenta para resolver um subproblema.

A terceira era foi apontada, por Broadbent e Ward (1971), como a geração que buscava encontrar soluções que deixassem elementos que pudessem ser definidos pelos próprios usuários. Este pensamento ia ao encontro da atenção ao usuário (característica dos anos 1970), e estava em contraste com a abordagem analítica (anos 1960), conforme afirmou Moreira (2007). Corroborando este raciocínio, Bayazit (2004) e Moreira (2007) afirmaram que Rittel enxergava, nesta geração, um envolvimento do usuário e os seus objetivos nas decisões do projeto.

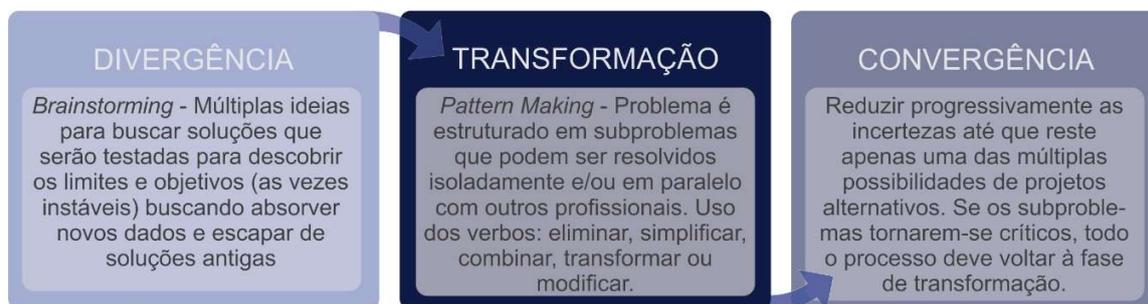
Hileman (1998) afirma ainda que a terceira época (inovação técnico social) foi marcada pela preocupação em um campo mais amplo de fatores, que estavam atrelados à um ambiente econômico e ecológico tanto nos conceitos de mercado quanto nas questões sociais, e que demandavam preocupações acerca de impacto ambiental, igualdade social, funcionalidade etc. Foi nesse momento que passaram a ser utilizados conceitos como “teste de mercado” e “grupo focal” (mais aplicáveis ao design do que à arquitetura), pois as equipes de projeto começaram a encontrar usos reais para a psicologia na abordagem do projeto.

Para Hileman (1998), esta foi a época em que os arquitetos foram confrontados pelos esforços, que envolviam os designers e acionistas de grandes empresas, e foram forçados a estudar os métodos de projeto, visando entender e praticar esta abertura do

projetista quanto à um exame minucioso do processo, além da entrada de informação em qualquer etapa do projeto.

Segundo Hileman (1998), o precursor da área (Chris Jones) enxergava o projeto, em 1970 (4ª era), como um processo que deveria ser desconstruído em três etapas<sup>15</sup>:

Figura 2 – Desconstrução do Projeto em três fases segundo Jones em 1970.



Fonte: Autor, 2019.

Hileman (1998) também afirma que a última fase seria o único aspecto do projeto que parecia apresentar uma explicação completamente racional, e que, portanto, poderia ser feito por um computador. A ironia vista pelo autor é que, para ele, o projeto até então (em 1970) se resumia à fase de convergência, e que era possível que esta mesma fase se tornaria a única que não seria realizada por projetistas no futuro.

Para Hileman (1998) os computadores iriam direcionar o papel dos projetistas para os estágios iniciais do processo de projeto (divergência e transformação) onde a flexibilidade, a intuição e o suave foco de atenção seriam características requeridas. Já os sistemas com base em conhecimento assumiriam a fase de convergência, o que poderia remeter o problema novamente ao projetista, e isto aconteceria quando as contradições

<sup>15</sup> Spuybroek (2004, p. 9), ao definir o termo convergência, afirma que esta é uma fase onde “as informações são reunidas, selecionadas, representadas graficamente ou mapeadas [...]. Um movimento em direção à qualidade, ordem e organização”. Já o termo divergência é caracterizado como “um movimento de atualização, onde o diagrama organizacional germina e se torna formativo. Um movimento em direção à quantidade, matéria e estrutura”.

forçassem a reavaliação dos objetivos do projeto. Ainda segundo o autor, a iteração<sup>16</sup> de projetos completos a partir de uma determinada definição de problema de projeto iria se tornar mais rápida à medida em que a base de conhecimento do projetista e a potência dos computadores aumentassem.

Ainda na historicidade do tema, Bayazit (2004) afirma que na década de 1960 surgiram pesquisas sobre as necessidades dos usuários em relação aos espaços construídos, estudos estes que influenciaram e originaram as normas específicas sobre a temática na Holanda, Suécia, França, Inglaterra e Dinamarca. Foi ainda nesta década, na Holanda (VAN DER VOORDT e VAN WEGEN, 2005) e na Turquia (BAYAZIT, 2004), que algumas universidades pesquisaram sobre métodos de projeto e programa arquitetônico, além de incluírem em suas grades de ensino disciplinas sobre o assunto.

Moreira (2007) afirma que nos anos seguintes o assunto tomou rumos diversos em virtudes dos grupos de pesquisa sobre métodos de projeto, como no Reino Unido em 1967, em que se fundou a *Design Research Society* (Sociedade de Pesquisa em Projeto), grupo responsável pelo periódico, ainda ativo, *Design Studies*.

Segundo Hileman (1998), surgiu em 1966 nos Estados Unidos o *Design Method Group* (Grupo de Métodos de Projeto), fundado por Gary Moore (o então estudante de arquitetura na Universidade de Berkley) e Marvin Manheim (estudante do MIT). O grupo, entre 1966 e 1971, publicou o *DMG Newsletter*, conforme Bayazit (2004), que relatou que este mesmo periódico entre 1971 e 1976 adotou o nome de *DMG-DRS Journal: Design Research and Methods*, para em 1976 mudar o nome para *Design Methods and Theories*, nome este que segundo o autor permanecia ativo até a data da publicação de seu trabalho.

---

<sup>16</sup> Processo de resolução de uma equação mediante operações em que sucessivamente o objeto de cada uma é o resultado da que a precede (HILEMAN, 1998).

## 2.1.2 As fases do processo de projeto

Lawson (2011) afirmou que o *Royal Institute of British Architects* (RIBA), formado em 1834 na Inglaterra, propôs um mapeamento do processo de projeto no seu manual de administração e prática arquitetônica, de 1965. Neste manual, o processo de projeto se dividia em 4 fases:

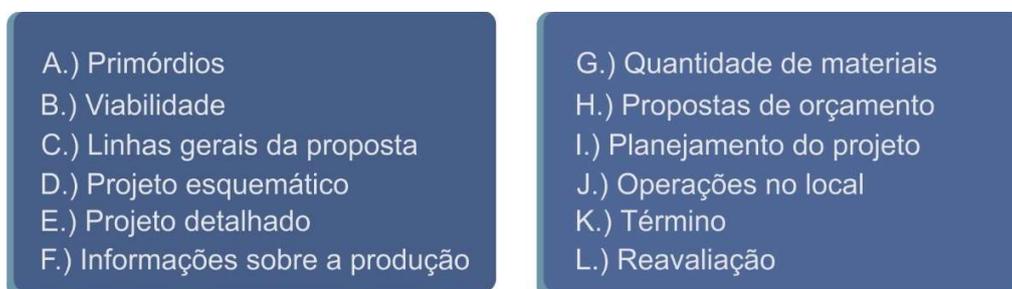
Figura 3 – As fases do processo de projeto propostas pelo RIBA em 1965.



Fonte: Autor, 2019.

O próprio manual do RIBA dizia que não necessariamente estas fases seriam sequenciais, isto porque o autor afirma que “os projetistas têm de reunir informações sobre o problema, estudá-lo, imaginar uma solução e desenhá-la; embora não necessariamente nessa ordem” (LAWSON, 2011, p. 43). O autor afirma ainda que o manual apresentava também um plano de trabalho com 12 estágios de ação lógica descritos na figura 4.

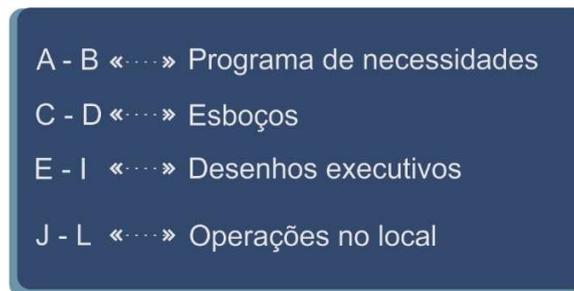
Figura 4 – Plano de trabalho do projeto de acordo com o RIBA.



Fonte: Autor, 2019.

Lawson (2011) afirma que o manual indicava terminologias comuns em relação aos 12 estágios de trabalho. As terminologias (muito utilizadas ainda hoje durante o ensino e o ofício arquitetônico) são apresentadas na figura 5:

Figura 5 – Terminologia comum do processo de trabalho do RIBA.



Fonte: Autor, 2019.

O que se nota é que o plano de trabalho do RIBA não descrevia o processo em si, mas sim os produtos do trabalho do arquiteto. De fato, Lawson (2011) diz que estas fases do projeto eram utilizadas para combinar com os clientes em quais etapas do trabalho haveria pagamento parcelado do ofício, visto que um projeto poderia demorar mais de um ano, até começar a ser executado.

Lawson (2011) afirmou que foram dois acadêmicos chamados Tom Markus e Tom Maver que produziram, entre 1969 e 1970, mapeamentos mais elaborados do processo de projeto no ofício arquitetônico. Segundo Lawson (2011, p. 45) os acadêmicos diziam que “o quadro completo do método de projetar exige uma sequência de decisões e um processo de projeto ou morfologia, e sugerem que é necessário passar pela sequência de **análise, síntese, avaliação e decisão** do processo de projeto” (grifo nosso). Esta sequência corresponde às fases 2, 3 e 4 do manual do RIBA, segundo Lawson (2011), que também definiu cada um dos segmentos da sequência proposta:

Figura 6 – Sequência do processo de projeto de Tom Markus e Tom Maver.



Fonte: Autor, 2019.

Para Moreira (2007), o maior expoente em *Design Methods* foi Christopher Alexander que era formado em matemática e chegou a estudar Arquitetura na Inglaterra, mas abandonou o curso por insatisfação. A tese de Alexander em Harvard, em 1964, tinha o título de *'Notes on the synthesis of form'*, e sua participação no início do estudo em processo de projeto foi a defesa da independência entre os elementos projetuais para que pudessem responder às exigências necessárias.

Moreira (2007) afirmou ainda que Alexander criticava os métodos sistemáticos em virtude de que eles trabalhavam o projeto como uma composição de conhecidos elementos. Para Alexander, esta era uma ideia pouco viável, visto que “cada projeto deveria rever a natureza desses elementos e a estrutura dos elementos físicos anteriores” (MOREIRA, 2007, p. 78). Na figura 7 é possível visualizar a trajetória histórica do desenvolvimento dos processos de projeto já apresentados pela pesquisa.

Figura 7 – Linha do tempo dos processos de projeto entre 1950 e 1970.



Fonte: Autor, 2019.

Mesmo considerado, por Moreira (2007), um dos maiores expoentes do assunto, à medida em que os *Design Methods* evoluíram, Alexander, que defendia que os métodos de projeto deveriam criar procedimentos, definidos, que viabilizassem o ato de projetar edifícios melhores, acabou renunciando à área, conforme relata Moreira (2007) ao afirmar que, para Alexander, as pessoas (que estudavam processo de projeto) haviam perdido completamente o objetivo de projetar melhores edifícios, e estavam interessadas em brinquedos, fazendo referência aos projetistas que utilizavam computador.

Foi esta a época que os métodos de projeto se tornaram, para Moreira (2007), um jogo intelectual, fato este que acarretou o abandono do campo de estudo por parte de Alexandre, quando renunciou ao comitê editorial da *Design Methods Newsletter* sob o discurso de que, para ele, os propósitos editoriais da revista não tinham valor, e ele não queria estar associado à ela. Moreira (2007) afirmou ainda que, ao renunciar a área, Alexander escreveu, em 1971, no prefácio da reedição do seu livro '*Notes on the synthesis of form*', que ninguém seria um projetista melhor por seguir, cegamente, um método.

É possível perceber um afastamento da busca de um método específico de projeto por parte de alguns arquitetos depois de 1970. Também neste raciocínio, Robert Venturi defendia, conforme Lawson (2011), que os arquitetos não necessariamente partiam do problema geral para casos particulares, e que em muitas vezes iniciariam o trabalho do detalhamento para que isto servisse de base para o projeto como um todo.

### 2.1.3 Processo de projeto no Brasil

No Brasil, por sua vez, os processos de projeto pouco influenciaram os programas de pesquisa e/ou ensino de arquitetura e engenharia, bem como a própria atividade profissional dos escritórios de projeto, conforme pontua Moreira (2007). Para Celani (2003), os arquitetos brasileiros encaravam com ceticismo os métodos de projeto, a ponto de julgá-los incompatíveis com a atividade criativa.

A autora também apontou possíveis motivos para a indiferença ao estudo dos processos de projeto no Brasil. Para ela as primeiras instituições de ensino de arquitetura eram baseadas na matriz francesa da *École de Beaux Arts*<sup>17</sup> que incentivava a formação artística do arquiteto. Segundo Celani (2003), esta visão permaneceu em muitas escolas de arquitetura e gerou como consequência a ausência de uma estrutura de processo de projeto e o procedimento de tentativa e erro na concepção arquitetônica.

Outro possível motivo sinalizado por Celani (2003) foi a tardia organização dos primeiros escritórios de projeto no Brasil (metade do século XX), e para complementar este quadro a autora afirma que estes primeiros escritórios se baseavam no talento individual do profissional responsável, ao invés de em um processo de projeto definido.

#### 2.1.3.1 O enfoque racional das normas brasileiras

Barros e Sakurai (2016) realizaram uma pesquisa que dividia o processo de projeto em dois enfoques complementares: o racional e o reflexivo. Para os autores, a origem do enfoque racional acontece nos anos 1960, a partir das teorias positivistas<sup>18</sup>, que buscavam

---

<sup>17</sup> Segundo Amaral (2008), os arquitetos formados com base na matriz da *École de Beaux Arts* tinham dificuldades de trabalhar em equipes, pois o trabalho destes arquitetos gravitava em torno do culto às suas personalidades, isto porque o ensino valorizava a concorrência e competição. No Brasil, os cursos iniciais dessa matriz não possuíam as matérias de geometria descritiva, física aplicada às artes, resistência dos materiais, mecânica, estereotomia, construção, higiene e legislação aplicadas à edificação.

<sup>18</sup> Sistema ou filosofia determinista (que entende que os fenômenos da natureza estão ligados entre si por leis universais e causalidade), criada por Auguste Comte, que defende o experimentalismo sistemático (metodologia experimental) como caminho científico, conforme Ribeiro (1988). O projeto, nesta visão

compreender o projeto dentro do campo lógico-positivista da ciência (Teoria da Informação, Teoria dos Sistemas, Pesquisa Operacional e Cibernética). Este pensamento era predominante à época da era da inovação tecno-social de John Chris Jones, momento em que apareceram os conceitos de análise, síntese e avaliação já explorados no presente capítulo.

O enfoque reflexivo, por sua vez, possui vínculo com uma abordagem construtivista onde, segundo Schön, (1983) análise e síntese são inseparáveis, visto que definir o problema é uma atividade tão propositiva quanto encontrar sua solução. Neste caso, aparecem verbos como “enquadrar”, “mover” e “avaliar” que podem se alternar sem uma ordem definida (BARROS; SAKURAI, 2016).

Para os autores, em casos onde existem situações com muitas variáveis e sem estratégia aparente, o projetista deverá simultaneamente desenvolver a abordagem ao projeto bem como o objeto projetado. A partir do exposto, é possível enxergar que ambos os enfoques são opostos e complementares (BARROS; SAKURAI, 2016).

Para conhecer melhor as definições e origens de ambos os enfoques, buscar Schön (1983), Buchanan, (1996), Dorst (1997) e, Barros e Sakurai (2016). A presente pesquisa limita-se em defini-los e mostrar a predileção das normas brasileiras em relação à abordagem racional. Neste sentido, Barros e Sakurai (2016) fizeram um levantamento com base na norma NBR 13.531/1995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995), além do próprio Conselho de Arquitetura e Urbanismo – CAU/BR, onde foram encontradas as seguintes etapas para o processo de projeto e serviços:

---

científica, pode ser entendido como um processo racionalizável, no qual, “busca-se uma observação ‘objetiva’ sobre o objeto de estudo e resultados que sejam generalizáveis”. (BARROS; SAKURAI, 2016, p. 2).

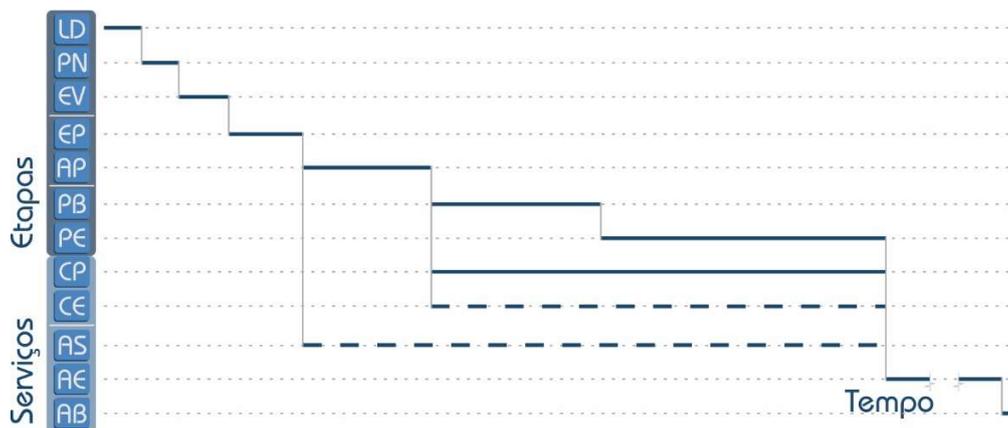
Figura 8 – Etapas do processo de projeto e serviços das normas abordadas.



Fonte: Autor, 2019.

Barros e Sakurai (2016) propõem dispor, através de um diagrama de Gantt, as etapas presentes nas normas, conforme figura 9, onde a etapa de execução aparece interrompida para não associar sua duração à do projeto, e onde as etapas opcionais são apresentadas tracejadas para diferenciação.

Figura 9 – Diagrama de Gantt das etapas do processo de projeto no tempo.



Fonte: Adaptado de Barros e Sakurai, 2016.

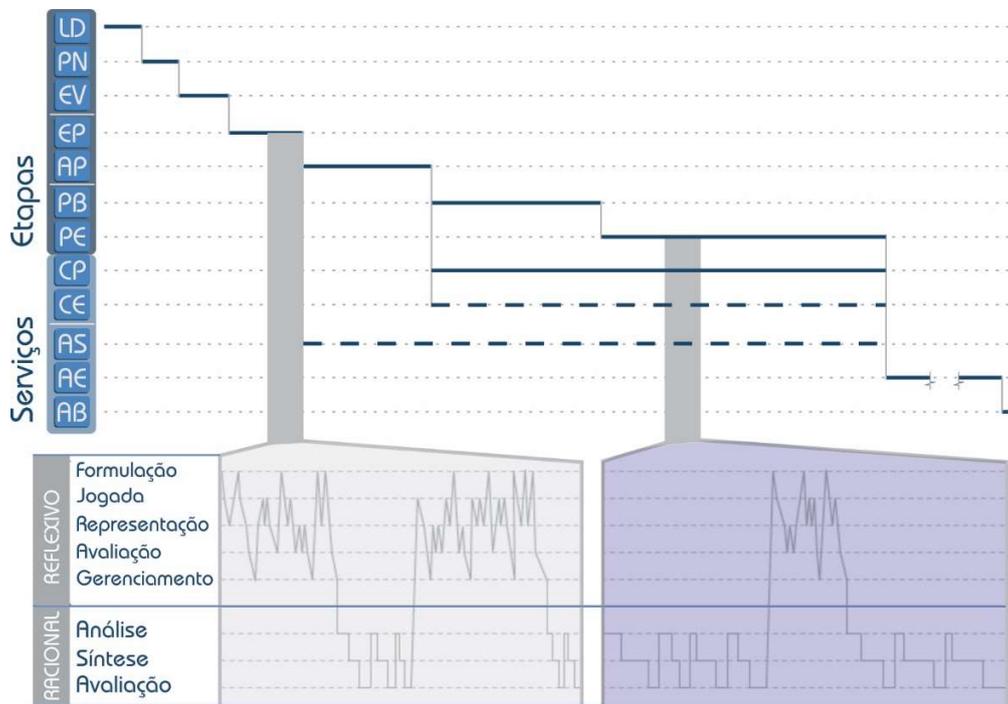
Barros e Sakurai (2016) seguem o raciocínio afirmando que as etapas presente nas normas brasileiras são frequentemente utilizadas na área de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações (AECO), e possuem também normas equivalentes em outros

países, como França, Canadá, e Inglaterra, onde o próprio plano de trabalho do RIBA evidência que o objetivo destas etapas propostas seria mostrar os produtos e serviços que devem ser entregues em cada etapa, e não do processo de projeto em si, como já evidenciado neste capítulo.

Os autores defendem este modelo em virtude da complexidade e do número de atores envolvidos na indústria AECO, entretanto ressaltam que a apresentação da evolução do projeto, por meio de um diagrama de Gantt, pode transmitir a mensagem, equivocada, de que o processo de projeto em si é linear e constante. Neste contexto, apresentar uma parte cíclica e menos ordenada do processo pode ser compreendido como uma distorção do próprio processo ou até como incompetência (BARROS; SAKURAI, 2016). Essas etapas cíclicas e inter-relacionadas às quais se referem os autores foram postuladas por Lawson e Dorst (2009) e envolvem: Formulação, Representação, Jogada, Avaliação e Gerenciamento.

Barros e Sakurai (2016) terminam dizendo que é possível estabelecer um equilíbrio entre os enfoques racional e reflexivo onde “em uma situação ideal os projetistas e todos os intervenientes teriam clareza da alternância entre os modos de trabalho típicos de cada um dos enfoques, e respeitariam suas especificidades” (BARROS; SAKURAI, 2016, p. 09). A figura 10 apresenta o pensamento dos autores de como a alternância entre os enfoques deveria acontecer.

Figura 10 – Alternância entre os enfoques racional e reflexivo ao longo do projeto.



Fonte: Adaptado de Barros e Sakurai, 2016.

Na parte superior da figura 10 apresenta-se uma repetição das fases do projeto no tempo através de um gráfico de Gantt, e na parte de baixo é possível observar a alternância entre os enfoques racional e reflexivo durante as atividades que englobam o processo de projeto.

Para continuar a discussão sobre processo de projeto após a década de 70 é imprescindível discutir a mudança de mediação no projeto ocasionada pelo advento da computação e os consequentes processos digitalmente mediados.

## 2.2 Processo digital de projeto

Para Oxman (2006), a composição formal no Processo Digital de Projeto (*Digital Design*) está criando uma nova definição do papel da representação no processo projetivo. Isto porque este processo digitalmente mediado se contrapõe às “centralidades dos

conceitos tradicionais feitos em papel” (OXMAN, 2006, p. 249), uma vez que estes conceitos não conseguem explicar o pensamento e os processos metodológicos que se associam aos processos de projeto com mediação digital. Para a autora, as avançadas técnicas digitais não mudam o modo de representação no projeto, mas, sim, estabelecem novos caminhos para o pensamento projetivo.

### **2.2.1 A mudança na mediação**

Para Young (2011), a geometria<sup>19</sup> perpassa as relações entre a arquitetura e suas metodologias de projeto e exerce um papel de mediação arquitetônica (elo intermediário entre sujeito e objeto). Para o autor a modelagem tridimensional pode estar corrigindo a relação entre geometria e arquitetura, fazendo referência a uma possível associação equivocada, na visão dele, em que a função do ensino de geometria/desenho estava relacionada à esperança dos arquitetos renascentistas de que a beleza de um projeto arquitetônico pudesse ser julgada completamente através do desenho.

Young (2011) defende que a geometria é uma parte integrante da construção arquitetônica e da representação, e que nestas áreas o entendimento deste assunto (geometria) pode mudar bruscamente, haja vista que na construção o conceito envolve as medidas que traduzem o desenho para a edificação, ao passo que na representação o termo pode ser o modo de representação (projeção) ou o próprio objeto representado (forma).

Neste contexto é possível encontrar diversas associações ao meio e mediação, como apontado por Wilke (2010), que entende o meio como o fator que nomeia o campo que liga o aparelho sensorial humano, recepção e interpretação de estímulos sensoriais, ao mundo. Por isso, ele é constituído pela interação entre fatores históricos (sociais, estéticos e tecnológicos) e o natural (físico e fisiológico). Neste ponto entraria então o entendimento de que a modelagem tridimensional pudesse, diferente da representação clássica,

---

<sup>19</sup> Segmento da matemática que estuda o espaço e os objetos que ali podem ser representados, conforme dicionário Michaelis.

viabilizar, de modo complementar, a análise da beleza de um projeto arquitetônico por meio da experimentação dos fatores já citados, além de associar elementos inerentes à tectônica (assunto explorado mais adiante neste capítulo).

O entendimento de Wilke (2010) pode ser considerado também como uma das possíveis descrições de representação arquitetônica. Este raciocínio é apresentado por Young (2011), que explica que a arquitetura é a forma artística que domina a percepção das pessoas quando em estado de distração, além de ser também a área artística onde discurso e a prática são formados na mediação (múltiplas negociações) entre geometria abstrata, expressão visual e interpretação.

Camerota (2004) apresenta o Renascimento como o período histórico onde ocorreu uma mudança crucial na mediação da arquitetura: o desenvolvimento do projeto<sup>20</sup>, e nele a utilização de desenhos escaláveis e mensuráveis, passíveis de serem compreendidos por meio de um sistema de regras acordadas. Nestes desenhos, considerados por ele como objetos híbridos, a visualização gráfica de um edifício aconteceria de modo indissociável das medidas que regulam a geometria plana (Euclidiana).

Foi neste período histórico também em que se iniciou o que Carpo (1998) chamou de remediação da construção material oral, que, na Idade Média, acontecia através das mãos do pedreiro medieval e passaria a existir por meio do desenho de projeto, mensurável, do arquiteto no Renascimento (o autor trata, neste ponto, da comunicação da construção). É possível perceber que ambas práticas, oral e gráfica, trabalham com a geometria plana de Euclides, entretanto, possuem mediações radicalmente diferentes.

Desta análise, Young (2011) demonstra dois desdobramentos. O primeiro é a possibilidade de o controle do projeto, em tese, afastar-se do local da construção, visto que

---

<sup>20</sup> Na Idade Média as funções de arquiteto e construtor uniam-se em uma única pessoa, conforme Picoral (2006). Entretanto, no pós-Renascimento, as atividades de concepção e construção podiam acontecer separadamente, em virtude das novas relações sociais do trabalho que aconteceram neste período histórico e foram apontadas por Bicca (1984) como o fator que ocasionou a cisão entre projeto e execução; uma vez que o arquiteto passa a comunicar através do projeto de arquitetura as características e a maneira que a sua criação intelectual deve ser concebida.

a maneira de construir seria indicada no próprio projeto, por meio da geometria pragmática e precisa que relacionaria representação e construção.

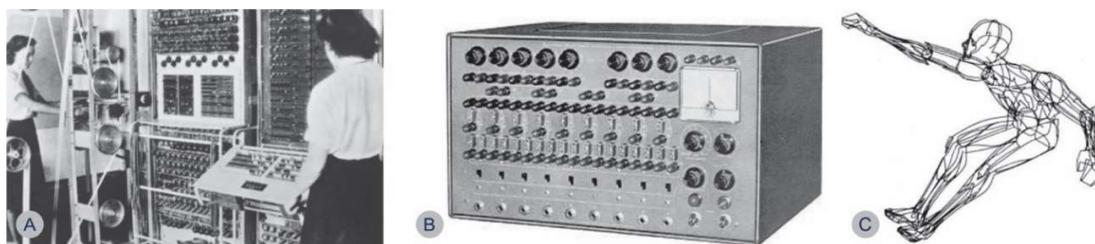
Já no segundo desdobramento, Young (2011) relata que seria possível ensinar estética arquitetônica como um código de regras proporcionais que seriam julgadas previamente no desenho antes da construção. Isto porque a geometria se fundiria com a imagem visual da representação de um edifício, permitindo que argumentos estéticos considerassem a beleza “percebida” como sendo estruturada pela lógica geométrica abstrata “concebida”.

Segundo Young (2011), essa importante transformação na práxis arquitetônica é o resultado de uma mudança na mediação de geometrias que já existiam. Para ele os *softwares* de modelagem, originados após a computação, não trouxeram nenhuma “nova” geometria, mas alteraram a mediação de maneira radical. Portanto, para o autor, entender as mudanças nas relações entre geometria e mediação é também compreender as mudanças que foram estimuladas pela representação digital na arquitetura.

Esta pesquisa, que já abordou os temas e conceitos relevantes ao processo de projeto até a década de 1970; agora discute a especificidade dos processos com mediação digital depois da linha do tempo anteriormente apresentada; e para isso serão necessários alguns apontamentos históricos relevantes aos assuntos abordados, visto que possuem relação direta com o processo digital de projeto.

Neste sentido, um expressivo fator no que tange o processo de projeto e a mediação digital arquitetônica é a invenção do computador e, como consequência, a computação gráfica. Esta tecnologia tem início com a criação da máquina de Turing, em 1936; máquina esta, que através de uma lista de operações matemáticas podia resolver um problema genérico, conforme Sguizzardi (2011). Batizado como COLOSSOS Mk1 (figura 11A) e desenvolvida durante a segunda guerra mundial pelos ingleses (com o auxílio de Turing), esta máquina é considerada o primeiro computador eletrônico da história.

Figura 11 – Exemplos notáveis da história da representação digital.



Fonte: Adaptado de Sguizzardi, 2011.

Posteriormente, em 1960, o computador analógico de baixo custo – EC1 (figura 11B) — é lançado pela empresa americana *Heatkit* com o intuito de ser utilizado em atividades pedagógicas, conforme afirmou Sguizzardi (2011). E de fato, a máquina foi muito explorada por engenheiros e por escolas, o que ajudou a democratizar o uso dos computadores. Neste mesmo ano, segundo o autor, o funcionário William Fetter, da empresa *Boeing*, cria o termo computação gráfica para “descrever o desenho de um boneco anatômico conhecido como *Boeing Man*” (SGUIZZARDI, 2011, p. 26) como pode ser observado na figura 11C.

Tedeschi (2014) afirmou que um dos primeiros a perceber o potencial do uso do computador para o projeto foi o arquiteto italiano Luigi Moretti, que em 1939 inventou a definição do termo “arquitetura paramétrica”<sup>21</sup>. Segundo Tedeschi (2014), Moretti em suas pesquisas concluiu que os parâmetros e suas interrelações se tornariam a programação de uma nova linguagem na arquitetura, na qual a estrutura (da programação), a definição dos parâmetros e suas relações deveriam ser sustentadas por ferramentas e técnicas das ciências, das matemáticas e dos computadores.

A primeira aplicação do computador ao projeto ocorreu em 1963, quando Ivan Sutherland desenvolveu um sistema de comunicação gráfica com a máquina, chamado *Sketchpad*, segundo aponta Tedeschi (2014). Nascia então o primeiro sistema *Computer*

<sup>21</sup> Uma expressão correlata é modelagem paramétrica que segundo Araújo (2018), tem sido utilizada atualmente para diferenciar os processos digitais de projeto da prática de utilização do CAD como uma espécie de prancheta eletrônica (uso do computador para representação gráfica e não como assistente do processo criativo).

*Aided Design* (CAD), demonstrando, à época, que os computadores poderiam ser utilizados no desenho e na modelagem digital de projetos (KALAY, 2004). Após esta contextualização é possível perceber que a mediação na arquitetura é um dos fatores que foram radicalmente modificados na história dos processos de projeto, passando pelos meios oral, projetivo e digital, como pode ser observado na figura 12.

Figura 12 – Diferentes mediações nos processos de projeto.



Fonte: Autor, 2019.

Muitos são os aspectos que contribuíram para que isso acontecesse: a invenção e evolução da computação; a facilidade de acesso aos usuários; o desenvolvimento da tectônica digital; a mudança na lógica do processo; os modelos de representação etc (assuntos estes, que serão abordados ainda neste capítulo e permeiam a discussão do processo de projeto digitalmente mediado). Neste sentido, é importante compreender as mudanças paradigmáticas que aconteceram na representação da arquitetura e do urbanismo, visto que este foi um tema catalisador das mudanças já citadas.

### 2.2.2 As mudanças paradigmáticas na representação

Historicamente, a documentação do projeto tem início após o advento da perspectiva, sendo a perspectiva, segundo Menezes (2000), a primeira sistematização de representação na arquitetura, haja vista que anteriormente não eram encontrados

registros (projetos) das edificações, pois os detalhes construtivos eram decididos em reuniões diárias na *Loggia*<sup>22</sup>.

Segundo Gonçalves (2009, p. 57), “a perspectiva foi incorporada pelos artistas de tal maneira que o espaço passou a ser compreendido mais pela sua representação do que pela vivência do espaço real, ou seja, a representação sistemática acabou prevalecendo em relação ao espaço percebido”.

Menezes (2000) afirma que a primeira teoria de perspectiva que considerava um observador colocado no infinito foi o *Manière universelle*, de Desargues, em 1636. Entretanto, o autor relata que foi no final do século XVIII que o sistema de Desargues foi retomado com o auxílio de Gaspar Monge. A primeira construção utilizando a perspectiva linear foi realizada no ano de 1420 por Brunelleschi, conforme Menezes (2000), que afirmou ainda que a Renascença foi o período responsável pela disseminação deste método.

Ainda segundo o autor, a Revolução Industrial do século XVIII foi o que catalisou o desenvolvimento técnico (e o próprio desenho técnico como consequência), por conta da inserção da geometria descritiva<sup>23</sup> como disciplina paradigmática para arquitetos e engenheiros. Menezes (2000) afirmou também que o desenho projetivo ganhou força com a Revolução Industrial, uma vez que, para o autor, o ensino tradicional de arquitetura se baseia, em grande parte no desenho projetivo que engloba desenhos bidimensionais, plantas, cortes etc. A redução de objetos de três dimensões para duas, foi possível justamente por conta da geometria descritiva, visto que possibilitou maior controle e precisão, e assim, permitiu o processo de produção seriada, além da documentação precisa, para que outros profissionais executassem o que era ideado por outrem.

Um fato que deve ser ressaltado, de acordo com Menezes (2000), é a portaria do MEC nº 1770/94, visto que após a publicação da mesma passaria a ser obrigatório no

---

<sup>22</sup> Local de trabalho, no canteiro de obras, onde se reuniam diariamente os mestres de projeto e execução para decidir detalhes construtivos (BICCA, 1984).

<sup>23</sup> A geometria descritiva é uma ramificação da geometria que trabalha a representação bidimensional de objetos tridimensionais.

currículo dos cursos o ensino de informática aplicada à arquitetura e urbanismo no Brasil, e este talvez tenha sido o início do questionamento na metodologia de ensino das disciplinas voltadas ao desenho<sup>24</sup>. Menezes (2000) propõe então três períodos históricos em que houveram mudanças paradigmáticas na documentação do projeto na Arquitetura e no Urbanismo: Renascença (método perspectívico), Revolução Industrial (método descritivo) e Década de 1960 (método computacional).

Com a evolução dos computadores e o maior acesso dos usuários, foi possível alcançar um maior poder e rapidez no cálculo matemático e processamento de dados. Foi este o contexto em que Wirz (2014) disse que uma mudança de paradigma poderia ser notada. Esta pesquisa não apenas vai ao encontro do pensamento do autor, como enxerga também um quarto momento histórico nas mudanças paradigmáticas que ocorreram na representação da arquitetura e do urbanismo: o método algorítmico<sup>25</sup>, como pode ser visto na figura 13.



Fonte: Autor, 2019.

### 2.2.3 O processo digital e o Novo Estruturalismo

Oxman (2006) afirma que as discussões anteriores à 1970 relacionadas às metodologias de projeto eram baseadas na modelagem formal e nas análises das atividades

<sup>24</sup> Importante apontar, neste ponto, a separação entre desenho de expressão e desenho de representação, uma vez que este último está diretamente relacionado à documentação do projeto e a normatização técnica.

<sup>25</sup> O algoritmo como assistente de processo de projeto, ou *Algorithm Aided Design* (AAD), é abordado mais adiante, ainda neste capítulo.

comportamentais, processuais e cognitivas do projeto (como demonstrou a primeira parte deste capítulo). Para a autora algumas destas pesquisas foram capazes de fornecer, identificar e comparar as diferenças entre os processos convencionais e os projetos realizados em ambientes mediados pelo computador.

No contexto digitalmente mediado, Oxman (2006) defende que o processo digital de projeto possui a capacidade de produzir arquiteturas únicas de geometrias não convencionais por meio das novas tecnologias. Henriques e Bueno (2010) corroboram este raciocínio quando afirmam que existe um novo paradigma na era da informação que se relaciona com a forma como a tecnologia tem alterado o processo e as ferramentas disponíveis na arquitetura e construção. Oxman (2006) observou que o discurso presente nos processos digitais de projeto foi fortemente motivado pelas transformações nas práticas arquitetônicas.

Para Oxman (2006) o processo digital de projeto pode ser entendido como um fenômeno que vem se solidificando como um campo único de discussão desde 1990, onde são discutidas, entre outras coisas, o modo como este processo de projeto altamente mediado possui metodologias exclusivas, com interação única entre as áreas envolvidas além da capacidade de exploração formal. Isto porque o processo digital não deve ser entendido apenas como uma forma de projeto convencional realizado com novas mídias, mas sim como um fenômeno ou uma nova forma de projeto onde as fases do processo passam a ser, segundo a autora, **representação, geração, avaliação e desempenho**<sup>26</sup> (grifo nosso), conforme figura 14.

Oxman (2006) afirma que no projeto digital a representação teria interdependência com a mídia utilizada para representar. A presente pesquisa prefere a palavra apresentação, em virtude de que nestes novos processos a forma é explorada ao mesmo tempo que representada.

---

<sup>26</sup> A palavra original em inglês utilizada por Oxman (2006) é *Performance*, que pode ser traduzida tanto como desempenho como performance, a presente pesquisa ressalta ainda que existem autores e bibliografias que também tratam este assunto como arquitetura performativa, entretanto, esta pesquisa optou por utilizar a palavra desempenho para inclusive fazer outras correlações com esta temática que foi recentemente incluída na norma Brasileira como será visto mais adiante neste capítulo.

Figura 14 – Processo digital de projeto descrito por Oxman (2006).



Fonte: Adaptado de Oxman, 2006.

Ainda sobre o modelo de Oxman (2006), a geração relaciona-se aos processos generativos da forma/projeto. A autora afirma ainda que no *Digital Design* a geração e interação com a forma diferem fundamentalmente do que ela chama de forma livre na representação clássica baseada em papel. A avaliação, segundo a autora, faria referência aos processos analíticos avaliativos, e o desempenho estaria vinculado às relações com o programa e o contexto. Outro aspecto relevante apresentado pela autora é que nos projetos digitalmente mediados as fases de geração e avaliação tornaram-se explícitas com procedimentos definidos.<sup>27</sup>

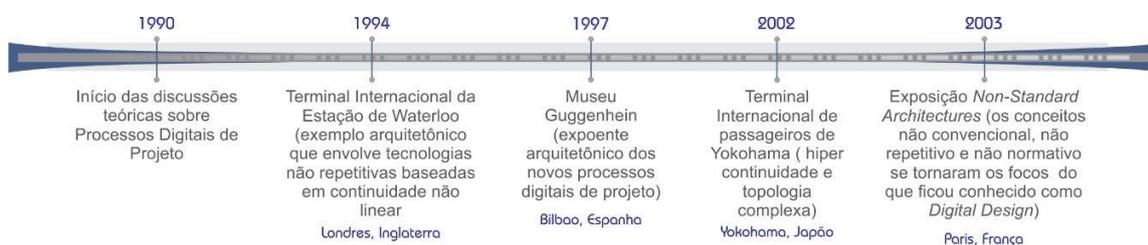
Oxman (2006) relata que no ano de 2003, com a realização da *Non-Standard Architectures Exhibition* no Centro Pompidou, em Paris, o conceito de design não-padrão, não-normativo e não repetitivo tornou-se um dos principais focos teóricos deste novo fenômeno reconhecido hoje como *Digital Design*. Esses novos conceitos presentes no processo digital de projeto contrapunham as definições de padrão e normativo, tão enraizadas nos métodos de projeto e no *design thinking*<sup>28</sup>, que através da chamada 'lógica

<sup>27</sup> Os modelos tradicionais de processos de projeto eram baseados, segundo Oxman (2006), em conhecimento implícito, no qual as fases de geração e avaliação não eram formalizadas e, por isso, eram associadas à intuição e criatividade, assunto correlato à explicação do enfoque racional das normas brasileiras proposto por Barros e Sakurai (2016). Já nos processos digitalmente mediados, justamente para que ocorra esta mediação, é preciso tornar os processos cognitivos em relações formuladas e representadas, passíveis de serem implementadas no computador através de recursos explícitos definidos.

<sup>28</sup> Brown (2010) considera o *Design Thinking* como uma metodologia de projeção onde o ser humano é colocado como central no processo (*human-centered*), e cujo objetivo é a produção de algo desejável e

de repetição', de Mitchell (2005)<sup>29</sup>, foi carregada a ideia implícita de que o módulo seria um formalismo que poderia gerar um mundo de ordem normativa por meio da reprodução ou repetição, tão fundamental para a era da industrialização das máquinas. Oxman (2006) apresenta em seu trabalho alguns aspectos relevantes ao início da trajetória histórica do desenvolvimento dos processos de projeto digitalmente mediados que foram condensados na figura 15, figura esta que também apresenta outros fatores relacionados ao tema:

Figura 15 – Linha do tempo do início do processo digital de projeto.



Fonte: Autor, 2019

Rivka Oxman e Robert Oxman (2010) fazem uma leitura interessante sobre a abordagem material e tecnológica no processo projeto. Para eles, o modelo utilizado anteriormente à mediação digital era o Formalismo, onde o arquiteto começava com a forma, para então passar para o engenheiro fazer a estrutura e só depois disso pensar no material. Já no processo digital de projeto essas fases acontecem de modo inverso, em um modelo que Rivka Oxman e Robert Oxman (2010) denominaram de Novo Estruturalismo,

necessário para as pessoas, através da busca criativa de soluções dos problemas encontrados (*solution-focused*). Esta metodologia não linear, incentiva a participação dos usuários e pode ser subdividida em inspiração, ideação e implementação, conforme Brussi (2014). Na primeira subfase utilizam-se os termos: desafio do projeto, observação e interpretação; na ideação: espaço para oportunidades, *Brainstorming* e formação de ideias; ao passo que na implementação são utilizados: experiência direta com protótipos, experimentação, aprendizado e repetição, (BRUSSI, 2014). A autora complementa o exposto ao dizer que o *Design Thinking* trabalha com intuição, reconhecimento de padrões, inovação, desenvolvimento de ideias tecnologicamente praticáveis de significado funcional e emocional.

<sup>29</sup> Para Mitchell (2005), no Projeto Digitalmente Mediado (*Digitally Mediated Design*), a arquitetura agora é projetada, documentada, fabricada e até montada com auxílio de meios digitais; além de ser também caracterizada por altos níveis de complexidade, o que permite, segundo ele, uma resposta mais flexível para melhor atender aos aspectos do local, programa, e intensão expressiva do projetista (o que no modernismo industrial não acontecia expressivamente, segundo o próprio autor).

onde o projeto arquitetônico se inicia pelo material e é motivado por conceitos estruturais (estruturação)<sup>30</sup>, para só então conhecer a forma.

Para os autores supracitados, no modelo anterior, o pensamento tectônico na arquitetura acontecia através da sequência: forma, estrutura e material. Já no Novo Estruturalismo, a forma deixa de ser o ponto inicial (*form making*) no processo de projeto, para ser o resultado da interação da sequência já apresentada (*form finding*<sup>31</sup>). Foi neste contexto que Tedeschi (2014) afirmou que forças e formas são e estão correlacionadas, e que o *form-finding* tornou-se uma estratégia importante na busca de formas não convencionais.

A mudança paradigmática do Formalismo para o Novo estruturalismo começa a acontecer, segundo Rivka Oxman e Robert Oxman (2010), no projeto da Ópera de Sidney (construído entre 1959 e 1973), quando arquitetura e engenharia trabalharam juntas e perceberam que na “solução final o problema da geometria dos ladrilhos de revestimento influenciou no desenho da estrutura da nervura e na forma geral do telhado. Isso efetivamente reverteu o processo tradicional para se tornar: material, estrutura, forma” (OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert, 2010, p. 15). As diferenças na ordem processual entre os modelos abordados são apresentadas na figura 16:

---

<sup>30</sup> Oxman e Oxman (2010) definem estruturação como o processo existente na relação lógica das partes de uma estrutura (nota-se que os autores diferenciam um termo do outro). A estruturação para os autores é historicamente derivada da tectônica que funciona tanto para o projeto geométrico, quanto para os procedimentos de análise/síntese performativa. No novo estruturalismo a lógica matemática/geométrica, sintática e formal que é necessária para a tectônica digital é fornecida pela nova estruturação (OXMAN; OXMAN, 2010).

<sup>31</sup> Sistema de exploração morfológica onde as formas são a resposta da integração entre o material e o carregamento por meio de um ou mais critérios, como equilíbrio estrutural, deformação etc (OXMAN, 2010). Sobre o exposto, Tedeschi (2014) afirmou que o *form-finding* surgiu na arquitetura no final do século XIX, e tinha o intuito de investigar estruturas otimizadas que emergissem das complexas e associativas relações entre materiais, formas e estruturas. Para o autor, como a forma nas geometrias complexas não poderia advir de soluções comprovadas (em virtude do pouco conhecimento vernacular do processo construtivo das formas não convencionais), o desenho tradicional não poderia ser usado como uma ferramenta para prever os resultados do projeto (fato este que era feito até então, visto que eram escolhidas soluções projetuais comumente utilizadas), como apontou Tedeschi (2014).

Figura 16 – Mudança no processo projeto no Novo Estruturalismo.



Fonte: Autor, 2019.

Nota-se que um dos grandes avanços alcançados pelo processo digital de projeto é a volta da ênfase dos conhecimentos inerentes ao estudo dos materiais e ao processo construtivo, já nas fases iniciais e definidoras do projeto arquitetônico. Isto foi possível pela união da tectônica com a capacidade de alto processamento de dados da computação.

### 2.2.4 Tectônica Digital

Segundo Amaral e Chupin (2009), a palavra tectônica é mais conhecida por conta da referência à teoria que estuda o movimento das placas continentais (área de pesquisa da geologia), entretanto, este termo também possui significado na arquitetura, na qual, segundo os autores, frequentemente se relaciona à “arte da construção”.

Os autores afirmam que mesmo que não houvesse uma discussão sobre tectônica da arquitetura durante o século XVIII seria necessário ressaltar que foi este o período em que a técnica começa a ganhar autonomia em relação à arquitetura<sup>32</sup>, bem como que foi este também o “século que se estabeleceu uma nova compreensão da física da construção,

<sup>32</sup> Nesta época, em Paris, a igreja Sainte Geneviève e as pontes de Jean-Rodolphe Perronet traziam uma edificação dependente do conhecimento técnico e do cálculo para sua realização. Esta nova maneira de pensar a arquitetura demonstra como a solidez arquitetônica pode não estar relacionada diretamente à geometria, mas aos conhecimentos técnicos da construção (AMARAL; CHUPIN, 2009).

a partir do desenvolvimento das ciências do cálculo, momentos estes que coincidiram com a separação das profissões de arquiteto e engenheiro” (AMARAL; CHUPIN, 2009, p. 151).

Meirelles e Kishi (2012) relatam que Kenneth Frampton, por sua vez, explorava um conceito mais abrangente de tectônica, onde uniam-se as condições locais e ambientais com a materialidade da arquitetura e os condicionantes culturais e estéticos. Nota-se que, ao longo dos anos, o termo foi perdendo a relevância na teoria da arquitetura. É possível que isto esteja relacionado também com a crescente fragilidade encontrada na formação em tecnologia no curso de Arquitetura e Urbanismo, ao menos no Brasil. Observa-se uma crescente diminuição da carga horária na área de tecnologia nos Projetos Pedagógicos dos Cursos (PPC's) de Arquitetura e Urbanismo.

O processo digital de projeto, de maneira indireta, vai de encontro a este raciocínio, e pode estar devolvendo aos profissionais a ideia de que a 'solidez' na arquitetura se relaciona com os conhecimentos técnicos da construção (tectônica) e não apenas com a geometria, como apontaram Amaral e Chupin (2009). Esta relação entre estrutura e arquitetura (que deveria ser indissociável), é uma relação que há de ser explorada e exaltada na formação e prática arquitetônica, visto que compreender o comportamento estrutural de um projeto, bem como sua execução, pode auxiliar benéficamente a exploração morfológica do mesmo (ARMERO, 2004; TEDESCHI, 2014).

Rivka Oxman e Robert Oxman (2010) associam o termo discutido à mediação digital quando defendem que a tectônica digital é a coincidência entre o programa utilizado para modulação (o que indiretamente engloba as entidades de modelagem, que serão discutidas no próximo capítulo) e as respectivas representações geométricas de estruturação. Para os autores, as topologias<sup>33</sup> estruturais são passíveis de serem moduladas por meio de

---

<sup>33</sup> A topologia na arquitetura é utilizada para desenvolver espaços complexos que otimizam o desenvolvimento de conceitos como conectividade e fluidez, como relatado por Vettoretti (2010). Quando analisados dentro da Topologia, o quadrado e triângulo são morfológicamente iguais, visto que se trabalha com as áreas destas superfícies, sendo possível lhes modificar/acionar em várias dimensões, de maneira a dar origem a geração de formas complexas que não são necessariamente planas e perpendiculares entre si. Para Tedeschi (2014), a análise topológica não requer medições métricas ou angulares, isto porque a topologia estuda a relação (comparação) entre as peças geométricas em deformação. Para o autor, a topologia possui duas características principais: a continuidade devido à tensão, na qual haverá uma correspondência entre os pontos da figura original e aqueles da transformada, mesmo que esta nova figura perca suas características

codificação (ato de compor os códigos ou parâmetros que serão inseridos no computador), como topologias paramétricas.

Neste sentido, a geometria associativa é capaz de auxiliar a prática projetiva em que as relações de dependência tectônica ou geométrica possam ser bases processuais digitais de projetos evolutivos e/ou generativos (OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert, 2010). Os autores explicam que neste processo é possível gerar parametricamente as variantes geométricas de uma classe estrutural por meio da variação dos seus componentes (entrada de dados ou *sliders*). Dessa maneira, a fabricação tem relação precisa com o próprio projeto, visto que os encaixes e/ou a execução são pensados nas fases iniciais de projeto. Esta prática leva o ato projetivo ao modelo do Novo Estruturalismo proposto por Rivka Oxman e Robert Oxman (2010).

Para os autores, os modelos de representação têm como objetivo o fornecimento de uma base geométrica e topológica para a descrição de princípios morfológicos que configure o todo e as partes na estruturação de um projeto. Estes princípios, que incluem fontes matemáticas e/ou geométricas na estruturação formal, podem advir de conceitos presentes no processo digital de projeto tais como: ramificação, padrões Voronoi, fractais, fontes biológicas, padrões materiais, princípios organizacionais biomiméticos etc.

### **2.2.5 Os modelos de representação na arquitetura**

Para explicar os modelos utilizados na Arquitetura e urbanismo, McMillan (1992) e Celani e Piccoli (2010) afirmaram que a palavra 'modelagem', em um contexto científico, relacionava-se à representação da realidade de maneira simplificada, abstrata e esquemática, onde seriam mostrados somente os elementos minimamente necessários para que se pudesse compreender determinados aspectos físicos de um fenômeno a ser estudado.

---

métricas e projetivas; e o homomorfismo, que afirma que as forças que podem causar perfurações ou sobreposição de material não são admissíveis após a deformação. Neste princípio, a presença do mesmo número de buracos em duas figuras, ou uma ausência total delas, leva ao homomorfismo.

De acordo com Celani e Piccoli (2010), quanto maior fosse a complexidade de um fenômeno, maior seria a indispensabilidade de modelá-lo. Isto porque, para McMillan (1992), situações reais poderiam ser demasiadamente complexas para serem compreendidas, e em virtude disso os modelos seriam ferramentas que poderiam apoiar o processo cognitivo de uma pessoa.

Ao trazer esta discussão para a arquitetura e o urbanismo, Celani e Piccoli (2010) dizem que os modelos são realizados para fins de apresentação. Outros exemplos de utilização, para as autoras, seriam o uso para apoio ao processo de design, planejamento e auxílio em intervenções de espaços existentes, e para fins analíticos tais como: testes em túneis de vento, simuladores de movimento do sol etc.

Santos (2003) apresenta uma divisão dos tipos de representação com ênfase no nível de detalhe de visualização. Para a autora os tipos de representação são: 2D e ortofotomapas digitais, 3D simples com *wireframe* e renderizado com texturas, 3D simples renderizados com texturas de fotografias, 3D com pormenores arquitetônicos que incluem a morfologia dos telhados e, por último, modelação volumétrica CAD completa com fotorrealismo associado. A autora afirma ainda que os modelos tridimensionais podem ser divididos em três classes independentes: Modelos de Estrutura em Arame<sup>34</sup>, Modelos de Superfície<sup>35</sup> e os Modelos Volumétricos<sup>36</sup>.

Dentro dos diversos modelos e técnicas de modelagens existentes na arquitetura, Mitchell (1975) apresenta os três métodos de representação que para ele são os mais utilizados: o análogo, o simbólico e o icônico. O autor afirma que os Modelos Análogos de

---

<sup>34</sup> Os "*wireframe models* são definidos por um conjunto de vértices unidos através de linhas e arcos, fazendo parecer uma estrutura em arame" (SANTOS, 2003, p. 72).

<sup>35</sup> Os "*surfaces models* representam o objeto como um conjunto ordenado de superfícies no espaço tridimensional. Os modelos de superfícies descrevem os objetos como uma combinação de vértices, arestas e superfícies virtuais com espessura igual a zero. [...] Estas superfícies podem ter diversos graus de complexidade, não sendo facilmente descritas por meios analíticos" (SANTOS, 2003, p. 73).

<sup>36</sup> Os "*volumetric models* representam os objetos tridimensionais por volumes ou sólidos. A estrutura de dados permite operações booleanas, bem como o cálculo de volume, do centro de gravidade e da área da superfície. Os modelos de sólidos representam sempre a hierarquia do objeto, onde as primitivas e as operações são definidas" (SANTOS, 2003, p. 74).

Representação (MAR) utilizam um conjunto de propriedades com o intuito de representar outro conjunto de propriedades daquilo que está sendo projetado. Para exemplificar este raciocínio, Mitchell (1975) cita a representação de Antonio Gaudí das funiculares<sup>37</sup> das forças, através de sacos de areia, (figura 17) em seu projeto, ainda em execução, da Sagrada Família.

Figura 17 – Estudo das funiculares através de MAR e igreja Sagrada Família.



Fonte: Autor, 2019.

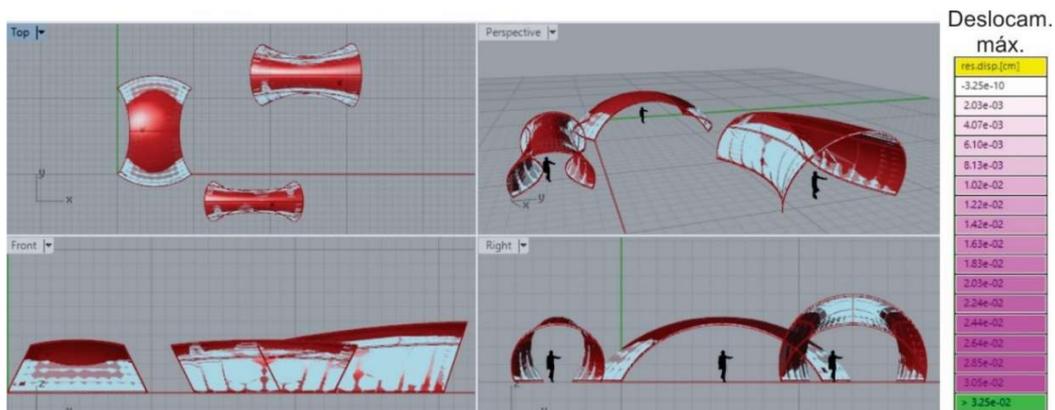
Gaudí, sabiamente, pendurou sacos de areia nos fios onde mentalizava que seriam os pontos de aplicação de carga (figura 17). Dessa maneira, o formato dos cabos seria a resultante da tensão imposta pela gravidade agindo por conta dos pesos dos sacos de areia (após atingir equilíbrio estrutural). Nota-se que já naquela época o arquiteto utilizou um mecanismo de *form finding*: Gaudí usou um espelho para projetar a forma final das abóbadas da igreja. Celani e Picolli (2010, p. 1) confirmam o exposto dizendo que “nesta representação os vetores de tensão são representados pelos fios, cuja forma e direção são análogas ao fenômeno físico que representam”.

---

<sup>37</sup> Caminho que as forças percorrem até chegar à fundação e/ou solo, segundo Engel (2014).

Já os Modelos Simbólicos de Representação (MSR), segundo Mitchell (1975), são utilizados na arquitetura para avaliar e simular desempenho térmico, lumínico, acústico e estrutural (figura 18). A representação ocorre por meio de símbolos (números, operadores matemáticos e palavras), sendo estes apresentados como tabelas, matrizes e operações matemáticas. Kolarevic (2007) complementa o raciocínio ao dizer que através dos MSR's os profissionais são capazes de fazer avaliações visuais e qualitativas mais rapidamente. Isto porque por meio da evolução na computação gráfica estes modelos agora permitem também “a exibição tridimensional de informações quantitativas sobre modelos geométricos, usando gradiente de cores” (CELANI e PICCOLI, 2010, p. 2).

Figura 18 – Análise, através de MSR, do deslocamento máximo estrutural.



Fonte: Autor, 2019.

Mitchell (1975) afirma que os Modelos Icônicos de Representação (MIR) são modelos em que a representação acontece de modo quase literal, por meio de transformações na escala e projeções em 2 e 3 dimensões. Para o autor, existe nos modelos icônicos "um estado particular do sistema onde realmente 'parece' a solução potencial que representa". Um bom exemplo de Modelo Icônico de Representação são maquetes físicas (figura 19A e B) e eletrônicas (figura 19C).

Figura 19 - Maquetes (físicas e digital).



Fonte: Autor, 2019.

Os Modelos Dinâmicos de Representação (MDR) são, segundo Pedrosa e Câmara (2004), modelos que descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo. O objetivo dos modelos dinâmicos é realizar a simulação numérica de processos dependentes do tempo, como nos modelos que simulam o fluxo e transporte de elementos fluídos. Greg Lynn, em 1995, utilizou um MDR (figura 20) para explorar morfologicamente o projeto para o Terminal de ônibus do *Port Authority Gate* de Nova Iorque<sup>38</sup>.

Figura 20 – Modelo Dinâmico de Representação dinâmica usado por Greg Lynn



Fonte: Kolarevic, 2003.

<sup>38</sup> Greg Lynn utiliza um repertório completo de técnicas de modelagem baseadas em movimento, como animação de quadros, cinemática direta e inversa, dinâmica (campos de força) e emissão de partículas. A cinemática é usada para estudar o movimento de um objeto ou de um sistema hierárquico de objetos sem considerar sua massa ou as forças que atuam sobre ela, ao passo que simulação dinâmica leva em consideração os efeitos das forças sobre o movimento de um objeto ou um sistema de objetos. Dessa forma as propriedades físicas dos objetos, como massa (densidade), elasticidade, atrito estático e cinético (ou rugosidade), são definidas; as Forças de gravidade, vento ou vórtice são aplicadas; detecção de colisão e obstáculos (defletores) são especificados; e a simulação dinâmica computada. Neste projeto específico de um telhado protetor para o terminal de ônibus em Nova York, feito por Lynn, foi utilizado um sistema de partículas para visualizar os campos gradientes de “atração” presentes no local, criados pelas forças associadas ao movimento e fluxo de pedestres, carros e ônibus (KOLAREVIC, 2003, p. 30).

De acordo com Pedrosa e Câmara (2004), um modelo dinâmico trabalha com uma representação matemática de um processo do mundo real e como este se relaciona em relação às forças a ele dirigidas. Para que isto ocorra, são realizadas determinadas suposições preestabelecidas em relação ao espaço, o tempo e o modelo matemático que descreve o fenômeno estudado.

Para Oxman (2006), neste modelo, faz-se necessário compreender a distinção entre forma e formação. Visto que os MDR's trabalham com formação, mas não utilizam a forma e suas categorias como premissas projetuais, estas técnicas de modelagem, que são baseadas em movimento (tais como: emissão de partículas, cinemática direta e inversa, animação de quadro-chave e campos de força dinâmica) "introduziram novos conceitos de espaço e forma dinâmicos que estão produzindo novos tipos de projetos interativos, dinâmicos e responsivos" (OXMAN, 2006, p. 254).

Isto posto, os MDR's são auxiliados por sistemas de *Algorithm Aided Design (AAD)*, *Particle-Springs System (PSS)*<sup>39</sup> e *Finite Element Analysis (FEA)* ou *Finite Element Method (FEM)*<sup>40</sup> este último descoberto por Jonathan Turner, juntamente à equipe da Boeing de 1952-53 (precursores do FEM), que focaram em conseguir prever as possíveis vibrações que podiam acontecer em determinadas regiões das aeronaves. Isto porque, no design aeroespacial, a dinâmica estrutural (vibrações, transientes, aeroelasticidade) vem em primeiro plano e a estática em segundo, pensamento contrário ao que acontece na

---

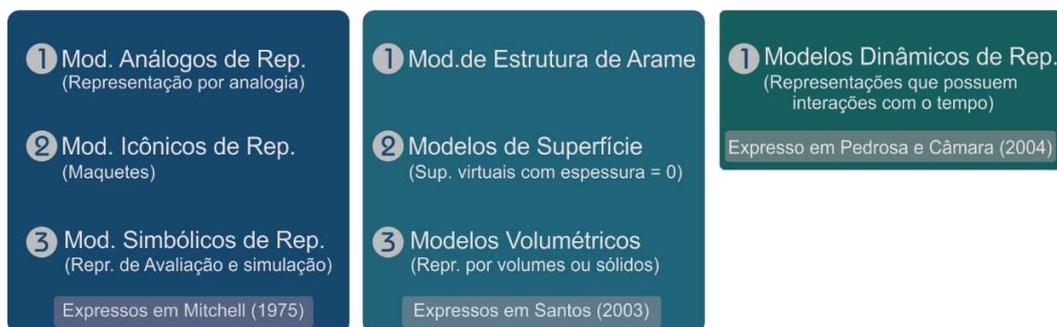
<sup>39</sup> De acordo com Kilian e Ochsendorf (2005), o sistema de partículas elásticas é um sistema que utiliza aglomeração de partículas ligadas linearmente por molas elásticas. Cada uma destas molas possuem comprimento inicial e coeficiente de amortecimento, além de lhes ser dada uma rigidez axial constante. Quando deslocadas de seus estados de repouso, as molas são capazes de gerar uma força de deformação.

<sup>40</sup> Segundo Zienkiewicz e Taylor (2011), no FEM a análise de estruturas pode ser feita a partir do Princípio da Mínima Energia Potencial Total, do Método de Resíduos Ponderados ou dos Princípios dos Deslocamentos Virtuais. A análise se vale dos conceitos de 'discretização' (*discrete*, em inglês, se refere a um modelo com número finito de incógnitas, por meio da divisão de um todo em partes com menor complexidade), de contínuo e de 'matriz de interpolação', que fornece os deslocamentos em um ponto no interior do elemento em função dos seus deslocamentos nodais. O FEM divide o modelo em muitas peças pequenas, de forma simples, chamadas elementos. Este método é uma contraposição às análises com um número infinito de variáveis, como as realizadas pela Teoria da Elasticidade que utiliza funções contínuas com infinitas incógnitas.

engenharia civil, em que a análise estática é primordial, exceto para eventos extremos (furacões, terremotos), conforme aponta Zienkiewicz e Taylor (2011).

Por meio dos sistemas auxiliares, os MDR's são capazes de gerar agilidade e economia de tempo no processo de projeto, fatores que podem tornar os projetos eficientes, leves e resistentes. A figura 21 mostra os modelos de representação junto aos autores que os apresentaram.

Figura 21 – Modelos de Representação



Fonte: Autor, 2019.

## 2.2.6 Os modelos de processos digitais de projeto

Oxman (2006) escreveu sobre o projeto na primeira era digital, quando defendeu que classificar os modelos digitalmente mediados é uma das maneiras pela qual é possível elucidar o meio em que ocorre o processo digital de projeto. Para ela, a pesquisa metodologicamente orientada sobre projeto pode estabelecer uma base conceitual visando uma abordagem teórica para o *Digital Design* (OXMAN, 2006). Foi neste contexto que a autora apresentou a seguinte classificação dos processos digitais:

Figura 22 – Modelos de processos digitais de projeto postulados por Oxman (2006).



Fonte: Autor, 2019.

Os modelos CAD são divididos em dois por Oxman (2006): CAD descritivos e CAD preditivos por geração-avaliação. Para ela, os sistemas clássicos de desenho assistido por computador são caracterizados como descritivos, uma vez que descrevem e manipulam as representações gráficas de objetos digitais. Ainda segundo a autora, os modelos preditivos trabalham a automação integrada de análise e síntese, além dos elementos clássicos de elaboração, modelagem e representação de objetos. Os processos analíticos e avaliativos se associam, segundo Oxman (2006), com custos, com comportamento estrutural, com desempenho ambiental etc. Este tipo de processo pode suportar a colaboração de diferentes áreas da indústria AECO, que auxiliariam a concepção.

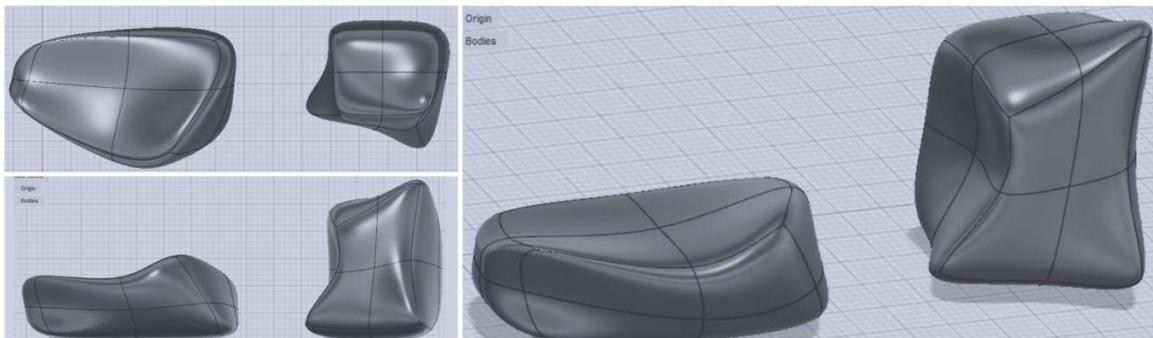
Outro aspecto relevante apontado pela autora tange as relações implícitas e explícitas nas fases do projeto (geração, representação, avaliação e desempenho). Quando uma fase possui ligação explícita com outra, significa, segundo Oxman (2006), que há um banco de dados compartilhado entre elas, e que qualquer mudança em uma acarreta mudança na outra, visto que estas são fases formuladas e automatizadas. Nos modelos CAD, as fases de representação e avaliação possuem relação explícita.

Os modelos de formação são apresentados por Oxman (2006) como técnicas digitais para a composição de formas onde a geração da forma relaciona-se com a interação entre o projetista e uma técnica digital que o capacita, ao invés da explícita estrutura representacional presente nos Modelos CAD. Em síntese, o projetista não trabalha especificamente com a representação de uma forma hipotética, definindo, entretanto, a lógica para a exploração morfológica que resultará em diversas opções de escolha. Este

raciocínio presente nas linguagens de programação, processos, algoritmos etc., é caracterizado pela autora como um processo de projeto não determinístico (uma vez que não determina a forma em si). A autora afirma ainda que esta é uma característica emergente nos processos digitais de projeto.

Oxman (2006) divide os modelos de formação em: exploração topológica, exposto na figura 23; formação baseada em projeto associativo e formação baseada em projeto dinâmico. O primeiro relaciona-se com investigação topológica, através de precisão por mouse, para a geração da forma; o segundo trabalha com design paramétrico e componentes generativos; e o último possui bases na metamorfose, animação, MDR, e outras maneiras de modelagem com relação direta com o tempo e movimento (já exemplificado pela figura 20).

Figura 23 –Processo digital de projeto por formação por exploração topológica.



Fonte: Autor, 2019

A terceira classificação dos modelos de projeto digital são os que trabalham com processos generativos nos quais ocorrem fornecimento de “mecanismos computacionais para processos de geração formalizados”, conforme nos indica Oxman (2006, p. 254). A diferença sutil entre os modelos generativos e os modelos de formação, é que neste apenas as regras de formação são explícitas, embora as qualidades formais dentro destas regras não são definidas. Outro aspecto relevante é que a relação entre as fases de geração e

representação é explícita (são automatizadas e possuem um banco de dados compartilhado).

Celani (2011) explica o sistema generativo (figura 24) como um “método indireto do projeto, no qual o projetista não se preocupa apenas com a solução de um problema em particular em um contexto específico. Ele (ou ela) procura criar um projeto mais ou menos genérico, que possibilite resolver problemas semelhantes em contextos diferentes” (CELANI, 2011, p. 1). Oxman (2006) divide os modelos generativos em transformações gramaticais (gramática da forma<sup>41</sup>) e Design Evolucionário (algoritmos genéticos<sup>42</sup>).

Figura 24 – Esquema de modelo generativo de projeto.



Fonte: Sedrez e Martino, 2018.

Godoi (2008) explica que a vantagem na utilização dos sistemas generativos de projeto residia na inovação e produtividade das formas que viriam a ser concebidas, visto que, com as regras de geração formal bem definidas e identificadas (família), era possível

<sup>41</sup> A Gramática da Forma (GF), ou *Shape Grammar*, foi desenvolvida por George Stiny e James Gips no início da década de 70 e possui origens na gramática generativa do linguista Noam Chomsky (década de 50) e no trabalho do matemático Emil Post (década de 40), que durante suas pesquisas desenvolveu um método de substituição de “caracteres em uma sequência de letras com o objetivo de geração de novas sequências (CELANI *et al.*, 2006, p. 182). Este sistema generativo de projeto consiste na exploração (produção) de formas baseando-se em regras específicas e em um alfabeto, no qual entende-se a composição formal de maneira similar à sintaxe na linguística.

<sup>42</sup> Celani (2008) e Godoi (2008) afirmaram que os algoritmos genéticos podem ser entendidos como um tipo de sistema inspirado nas ciências naturais. Isto porque, para as autoras, na teoria da evolução de Darwin, por conta da adaptação ao meio ambiente, cada nova geração de uma espécie apresentará um aperfeiçoamento genético quando comparado com a geração antecessora. Oxman (2006) afirma que, nos modelos evolutivos, a geração de formas deriva de uma codificação genética interna, o que substitui, para ela, a interação tradicional com a forma em si.

criar diversos projetos que pertencessem à uma mesma família; por conta disso, haveria a possibilidade de explorar um número maior de alternativas formais além de economizar tempo no processo exploratório. Celani (2008) afirmou que o sistema generativo de projeto poderia ser utilizado em três momentos: como **divergência** no design exploratório, como **convergência** na otimização de problemas e, como **família de objetos** (grifo nosso).

Um fato relevante sobre os sistemas generativos é que estes não precisam necessariamente ser implementados pelo computador, visto que existem exemplos de sua utilização em épocas anteriores ao advento da computação, conforme mostra Celani (2001). Godoi (2018) corroborou o exposto quando analisou o tratado de arquitetura de Alberti (*De re aedificatoria*) e constatou que já existia, na mente dos arquitetos renascentistas, o pensamento algoritmo, paramétrico e generativo<sup>43</sup>.

Para Fasoulaki (2008), os projetos generativos e os projetos de desempenho, ou performativos, são os dois paradigmas que dominam as tendências atuais de projetos digitalmente mediados. Neste sentido os modelos de desempenho<sup>44</sup> são considerados, por Oxman (2006), como um processo de formação que possui como base algum tipo de simulação de desempenho desejado (a forma é gerada por meio do desempenho ou comportamento definido pelo projeto). A autora divide esta classe de modelo de projeto digital em duas: formativo baseado em desempenho<sup>45</sup> e generativo baseado em desempenho.

---

<sup>43</sup> Esta constatação é importante porque desconstrói a afirmação de que “os sistemas generativos seriam resultantes da automação do processo de projeto propiciado por desenvolvimentos tecnológicos recentes” (GODOI, 2018, p. 39).

<sup>44</sup> Oxman (2006, p. 257) afirma que “desempenho pode ser definido como uma técnica de formação ou um processo generativo cujas variantes são parametricamente definidas pelas condições do problema, local, programa, etc.”. A autora complementa o exposto dizendo que este modelo de projeto muitas vezes pode ser mal interpretado como simplesmente um modelo de avaliação. Importante ressaltar que, no Brasil, apenas depois de 2013 o desempenho passou a configurar em processos normativos, regidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com a NBR 15.575:2013, onde a norma tem como foco o comportamento em uso dos sistemas que compõem as edificações habitacionais que visam atender requisitos dos usuários.

<sup>45</sup> As investigações da presente pesquisa se enquadram nesta classificação proposta por Oxman (2006).

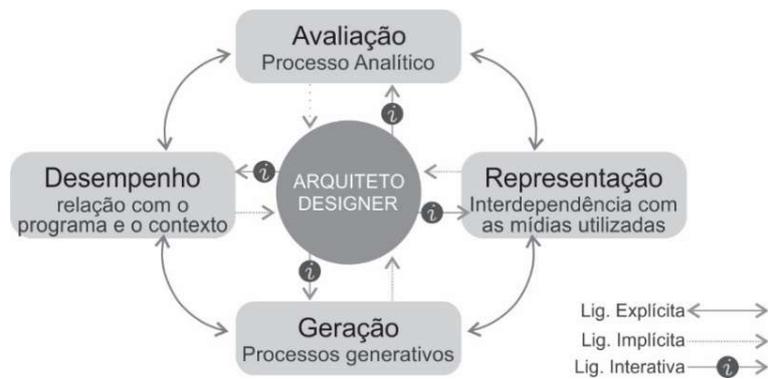
Embora a nomenclatura possa ser parecida, Oxman (2006, p. 257) afirma que “o projeto baseado em formação pode ser considerado como um projeto baseado em desempenho quando”, são aplicadas durante um processo de formação, simulações digitais de forças externas (desempenho ambiental, custo financeiro, perspectivas espaciais, sociais, culturais, ecológicas e tecnológicas). Ressalta-se que existe uma relação explícita entre o desempenho e a representação neste processo.

Já no projeto generativo baseado em desempenho, Oxman (2006) afirma que o desempenho impulsiona também os processos generativos, ou seja, o projetista pode interagir com três das quatro fases do processo digital (geração, desempenho e representação). Nesta metodologia, as três fases possuem relações explícitas, bem formuladas, automatizadas e com banco de dados compartilhado. A diferença dos processos generativos baseados em desempenho em relação aos de formação baseada em desempenho é que naquele apenas as fases de representação e desempenho são explícitas, ao passo que neste, além destas duas fases explícitas, há também a capacidade de interagir, também através do desempenho, com a geração do próprio processo.

É possível que a exploração de dados advindos do desempenho do tripé “material, estruturação e forma” possa ser o mais alto nível que um projeto baseado no desempenho possa alcançar no processo de projeto evolutivo. Deste modo, “a morfogênese digital se tornará em algum momento a análise que leva à geração/evolução” (OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert, 2010, p. 20).

Por último, os modelos compostos são, para Oxman (2006), o futuro paradigmático dos projetos digitalmente mediados. Isto porque se baseiam na integração das quatro fases do processo digital de projeto (desempenho, geração, representação e avaliação). Para Oxman (2006, p. 260), “Idealmente eles irão proporcionar a interação com qualquer módulo de atividade com os dados e fluxo de informações em múltiplas direções”, conforme figura 25.

Figura 25 – Processo digital composto de projeto descrito por Oxman (2006).



Fonte: Adaptado de Oxman, 2006.

Após esta discussão, é possível notar temas que são tangenciais entre os processos digitais de projeto apresentados por Oxman (2006), os modelos de representação descritos por Mitchell (1975), além dos defendidos por Santos (2003) e Pedrosa e Câmara (2004), mediante se observa na figura 26, que demonstra os modelos explorados neste capítulo, em conjunto com os autores que os expuseram.

Figura 26 – Modelos de representação e processos digitais de projeto.



Fonte: Autor, 2019.

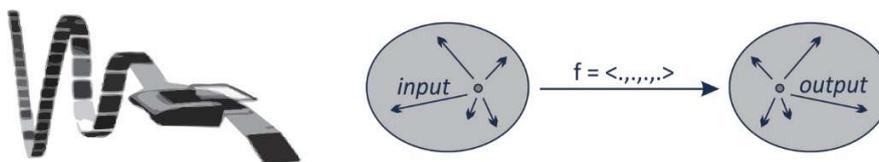
Kotnik (2010) divide os processos digitais de projeto de Oxman (2006) em três níveis de computabilidade representacional, paramétrico e algorítmico. Para explicar seu raciocínio é preciso discutir o conceito da máquina de Turing. Neste sentido, o computador como máquina física (mediador dos processos digitais de projeto), tem sua origem nos

princípios projetuais da máquina de computar de John von Neumann. Estes princípios, são segundo Kotnik (2010), implementações da concepção da computação de Alan Turing e sua máquina universal, onde um programa qualquer ( $p$ ) pode ser visto como uma função computável e definida em um conjunto de parâmetros (*input*) presente nos números naturais  $\mathbf{N}$ , que possui o seu próprio subconjunto de parâmetros definidos de saída (*output*)<sup>46</sup>. No raciocínio ora explicado, tem-se que:  $p(input) = output$ .

Isto porque no ambiente digital, segundo Kotnik (2010), é preciso que haja uma função computável que trabalhe como mediador entre os domínios de entrada e saída (*input e output*). Para o autor, tudo o que pode ser feito em um computador, pode em teoria, ser formulado para uma máquina de Turing.

Kotnik (2010) explica esta máquina como uma fita infinita e unidimensional dividida em células. A máquina também possui uma cabeça móvel capaz de ler e escrever nestas células (figura 27). Em cada célula da fita existe o símbolo 0 ou 1, de modo que a cabeça móvel pode se mover e escanear o símbolo para realizar três ações: ler o conteúdo, escrever e mudar e/ou avançar para a próxima célula.

Figura 27 – Modelo abstrato da computabilidade de Turing.



Fonte: Kotnik, 2010.

<sup>46</sup> O texto original de Kotnik (2010) chama os parâmetros *input* e *output* de 'para' e 'var', para melhorar a didática da explicação, a pesquisa optou por deixar os termos em inglês *input* e *output* (também presentes na explicação original) por considera-los diretos e autoexplicativos. No que tange à explicação: em termos práticos, qualquer função  $f(input)$  é capaz de ser descrita por um programa  $p(input)$ , facilitando a questão principal da computabilidade. Isto porque, como declarou o autor, para que uma tarefa seja computável, é preciso que a mesma possua uma sequência finita e específica de instruções para que, quando seguidas, possam resultar na conclusão desta tarefa. Deste modo, uma função matemática 'f' é uma relação bem definida entre A (domínio) e B (subdomínio), onde para cada 'x' (que pertence ao domínio A) existe apenas um subdomínio 'y' como resposta.

A facilidade da máquina de Turing reside no fato de que além de computáveis, as funções matemáticas podem ser algorítmicas (as relações entre os domínios e subdomínios podem ser descritas como uma sequência de regras). Deste modo, as funções presentes nos aplicativos computacionais são versáteis o suficiente para abrigar e promover mudanças na forma como são entendidos os problemas presentes na arquitetura e no processo projetivo (KOTNIK, 2010).

Para o autor, as últimas gerações dos CAD's como o Rhinoceros e seu *plug-in*<sup>47</sup> Grasshopper<sup>48</sup> trabalham com processo de projeção, que possui como base esta lógica apresentada (máquina de Turing), onde cada entrada de dado do usuário, gera uma saída definida. Deste modo, “o processo sequencial de desenhar ou modelar a arquitetura por meio do software CAD pode ser considerado como o uso sucessivo de um número finito de várias máquinas de Turing” (algoritmo final desenvolvido no Grasshopper) voltadas especificamente para o projeto (KOTNIK, 2010, p. 3).

Para Oxman (2006), a descrição matemática da forma alcançada por meio do algoritmo é a base do uso representacional de ferramentas computacionais para desenhar ou modelar na arquitetura (fato este que pode ou não ser consciente). Paradoxalmente, é justamente este “grau de consciência” referente ao *background* computacional (e seu uso intencional) que pode também ser visto como as características definidoras do processo digital de projeto. A autora ainda afirma que este “grau de consciência” no ato projetivo pode ser o limite entre o processo digital e o não digital de projeto.

Desta forma, os elementos definidores de uma função computacional ou, em outras palavras, a relação quantificável e algorítmica entre um domínio (*input*) e seu subdomínio correspondente (*output*), são orientados, segundo Kotnik (2010), pela definição de seus três níveis de computabilidade, conforme figura 28. Estes níveis são baseados na descrição

---

<sup>47</sup> Araújo (2018) define *Plug-in* ou *add-on*, como uma extensão de um aplicativo, que geralmente não pode ser executada isoladamente, e que permite que o usuário tenha acesso à outras funções além da original.

<sup>48</sup> O *Grasshopper* é um editor gráfico de algoritmos utilizado na arquitetura paramétrica para criar geometrias simples e complexas com uma interface do tipo *plug & play*. Este editor permite que um usuário com pouca ou nenhuma formação em programação consiga tirar partido das facilidades do algoritmo na exploração formal, conforme Celani e Sedrez (2018).

digital das funções computacionais 'f', ou nas sequenciais máquinas de Turing presentes em um algoritmo utilizado na programação de uma forma hipotética no processo digital de projeto (KOTNIC, 2010).

Portanto, a descrição, em termos de função matemática, de formas digitalmente definidas e seus elementos de domínio (*input*, *output* além das próprias relações entre ambos) podem ser divididas, segundo Kotnik (2010) em três níveis de computabilidade, que, segundo ele, são capazes de abarcar também as cinco classes paradigmáticas de processo digital de projeto propostas por Oxman (2006).

Segundo Kotnik (2010), o nível representacional é caracterizado pela utilização do meio computacional, principalmente, como ferramenta de desenho eletrônico. É, portanto, neste nível, que cabem os modelos CAD de Oxman (2006) que, para Kotnik (2010), empregam vários *softwares* de modelagem e renderização geométrica. Entretanto, possuem pouco ou nenhum efeito qualitativo no que tange o processo de projeto, além disso, estes modelos são essencialmente isomórficos (possuem relação direta) com os métodos de projeto que possuem o papel (meio físico) como base (é por isso que na figura 28, a função matemática deste nível de computabilidade apresenta-se como  $f(\textit{input}) = \textit{output}$ , porque os elementos que são alocados nos domínios de entrada, são exatamente os mesmo dos presentes nos subdomínios de saída).

Para exemplificar a aplicação deste nível de computabilidade, Kotnik (2010) apresenta o projeto da Kunsthhaus Graz, na Áustria, de Peter Cook e Colin Fournier. Neste projeto, utilizou-se um modelo físico existente, para descrever digitalmente (por meio da entidade NURBS de modelagem) a forma da envoltória do museu (figura 28).

Figura 28 – *Digital Design* de Oxman (2006) e seus níveis de computabilidade.



Fonte: Adaptado de Kotnik, 2010.

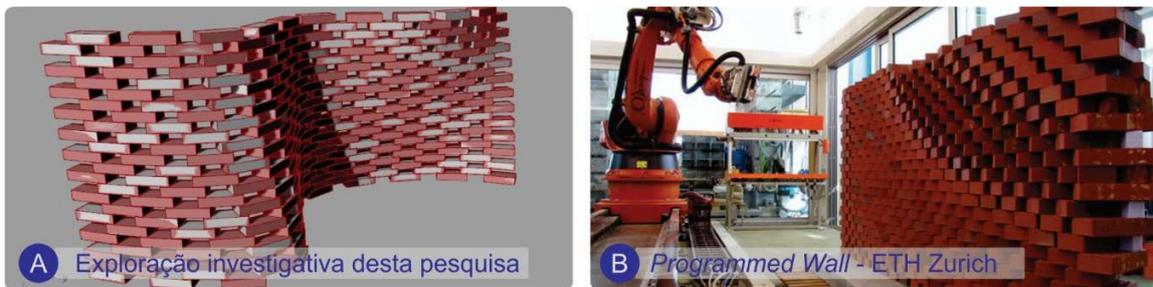
O autor apresentou o Museu da Mercedes-Benz, na Alemanha (figura 28), como demonstração de computabilidade paramétrica. Neste projeto cada elemento da forma do edifício é dependente da icônica logomarca da empresa. Para Kotnik (2010), este nível de computabilidade (paramétrico) pode ser caracterizado pela utilização de uma relação ‘f’ especificada através de um espectro de possibilidades entre *input* x *output* (função matemática entre entrada e saída de dados, que ocorre por meio da variação destes parâmetros hipotéticos).

Uma geometria que poderia exemplificar a ideia exposta acima seria uma parede paramétrica de blocos cerâmicos (figura 29A), na qual a forma final é gerada a partir da variação de parâmetros definidos. A Universidade ETH Zurich produziu uma parede similar através de fabricação e método de montagem robótica<sup>49</sup> e nomeou-a de parede programada ou *programmed wall* (figura 29B). O grupo de pesquisadores da universidade utilizou um braço robótico industrial KUKA de seis eixos de movimentação e 700 tijolos,

<sup>49</sup> A quarta revolução industrial e a fabricação robótica são discutidas no capítulo 4 da presente pesquisa.

além programar o próprio *script* responsável para traduzir o CAD em dados robóticos (NABONI; PAOLETTI, 2015), possibilitando assim o posicionamento de cada tijolo.

Figura 29 – Estudo de uma parede paramétrica de blocos cerâmicos.



Fonte: Adaptado de Naboni e Paoletti, 2015.

Ao relacionar a computabilidade paramétrica com os modelos de formação de Oxman (2006), Kotnik (2010) afirmou que estes modelos (formação) podem ser entendidos como um processo digital geométrico ou formal estruturado, capaz de proporcionar um alto nível de interação e controle (digital) ao arquiteto, e por isso seriam, para Oxman (2006), o limite entre os paradigmas digitais e não digitais de projeto.

Para finalizar sua classificação, Kotnik (2010) afirma que as relações de entrada e saída de dados em um nível algoritmo centralizam-se na própria função matemática 'f' digitalmente descrita e sua aplicação como estratégia de projeto. É preciso ressaltar aqui a diferença entre os dois últimos níveis de computabilidade apresentado pelo autor, sendo que o último nível utiliza a própria função matemática como processo digital e o nível paramétrico utiliza apenas a dependência entre os parâmetros definidores. Para Kotnik (2010), um exemplo desta aplicação pode ser observado no Centro Nacional de Natação em Pequim (já apresentado na figura 28), onde se adotou uma solução eficiente e racional que aparenta ser aleatória, mas não é.

Isto posto, Kotnik (2010) explica que os modelos gerativos de processo digital de projeto de Oxman (2006) caracterizam-se pelo fornecimento de mecanismos computacionais para processos generativos formalizados, e por isso relacionaram-se com

este nível algorítmico de computabilidade. Para o autor, os modelos de geração baseada em desempenho não seriam uma classe diferente dentro dos níveis paradigmáticos por ele descritos, visto que a mesma (classe) possui relações dependentes dos níveis antecessores, podendo, portanto, pertencer neste ou naquele nível de computabilidade (paramétrico ou algorítmico).

Para Oxman (2006 p. 241), “o que agora está se tornando característico de sistemas de projeto complexos e integrados é o grau de controle individual fornecido ao projetista em processos digitais”. Por isso a autora é enfática ao relatar a importância de profissionais altamente qualificados capazes de trabalhar com processos de projeto digitalmente mediados.

Nestes processos, e na conseqüente representação (agora compreendida como uma fase projetual que vem modificando-se ao longo do tempo), existem elementos, medições e simulações relacionadas ao mundo físico que se tornam difíceis de serem reproduzidos em uma mediação projetiva clássica (processo de projeto arquitetônico baseado no papel); mas que, entretanto, são passíveis de serem realizadas digitalmente. As simulações que ocorrem em função do tempo (modelos dinâmicos de representação), os emuladores do mundo físico e as entidades de modelagem são alguns dos elementos que demonstram a superioridade do processo digital de projeto quando comparado aos processos clássicos.

Importante neste ponto da pesquisa, discutir a mudança que ocorreu na lógica do processo de projeto após o desenvolvimento do *Algorithm Aided Design* (AAD), ou projeto assistido por algoritmo. Esta arquitetura baseada em algoritmos somente tornou-se possível em virtude do avanço das tecnologias da informação e a conseqüente evolução no processamento de dados dos computadores disponibilizados aos usuários, conforme Tesdeschi (2014).

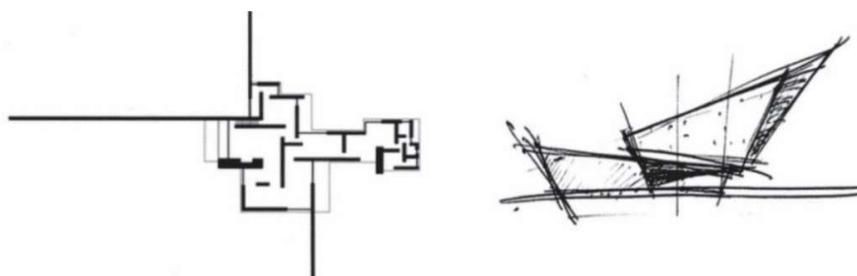
### 2.2.7 A mudança na lógica do processo de projeto

Tedeschi (2014) afirma que o processo de desenho clássico exclui aspectos fisicamente relevantes, e que no mundo real impulsionariam (ou pelo menos, deveriam impulsionar) a composição formal. Outro quesito importante apontado pelo autor, é que o ato de desenhar acontece de maneira diferente dos mecanismos cognitivos implícitos ao processo criativo. Neste quesito, ao invés de adicionar informações (como acontece no desenho tradicional), estabelecem-se interrelações entre as informações.

Para o autor são estes dois quesitos que limitam o desenho clássico, e foi por isso que ele foi enfático ao dizer que não existe relação associativa<sup>50</sup> capaz de ser gerenciada no modo tradicional de desenho, justamente porque seria compreendido como um processo aditivo, por meio do qual a complexidade poderia ser alcançada pela adição e sobreposição de sinais independentes (primitivas gráficas) que seriam traçados sobre o papel.

Para exemplificar o exposto, Tedeschi (2014) apresenta a figura 30, na qual o desenho da esquerda é uma planta (baixa) de Mies van der Rohe e a comparação à direita seria um rascunho, nos quais a única coisa que havia em comum entre ambos seria, para o autor, a visão ontológica de que ambos seriam apenas sinais em um papel, mesmo que representando coisas diferentes.

Figura 30 – Dois exemplos de desenhos feitos pelo processo tradicional.



Fonte: Tedeschi, 2014.

---

<sup>50</sup> Lógica que relaciona dois conceitos que não pertencem à mesma estrutura de hierarquia. Ao projetar utilizando essa lógica é possível trazer informações relevantes ao projeto ou ao *form finding* como resistência, tensão, deformação, propriedades do material etc.

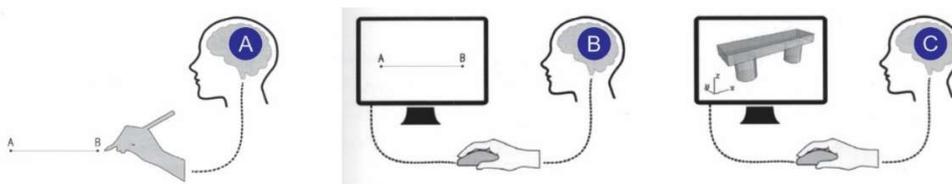
Tedeschi (2014) compreende que a consistência do desenho (que é baseado em acordos sociais) é garantida pelo próprio projetista e não pelo meio em que é realizado. Isto posto, o desenho não é para o autor um meio inteligente, mas um sistema baseado em normas e convenções.

Para Tedeschi (2014), o desenho tradicional era incapaz de gerenciar forças (como a gravidade) e restrições que afetassem e restringissem ações como deslocamentos e deformações. Seriam então limites como estes que haveriam de restringir a exploração da forma no método clássico de desenho, e esta seria a causa defendida pelo autor que fez os projetistas repetirem sistemas tectônicos comuns ao invés de inová-los.

Antes da industrialização da construção, quando a produção da arquitetura ainda era condicionada aos métodos de manufaturas artesanais, as formas complexas eram muito valorizadas. No entanto, dada a pós-guerra, grandes mudanças ocorreram no modo de se produzir arquitetura; esta mudança de cenário é apontada como uma das bases do movimento moderno. Nesse período, surge também uma postura ideológica em favor das formas simples, puras, levando ao desaparecimento das formas complexas. Outra questão a se considerar, no que diz respeito à simplificação das formas, são os meios de produção industrial do início do século XX, que estavam direcionados à produção em massa (SEDREZ, 2018, p. 56).

No início dos sistemas CAD estes limites relatados (incapacidade de gerenciamento de forças pelo método clássico de desenho) não haviam sido superados pelo computador, conforme relata Tedeschi (2014), que afirmou também que estes softwares apenas melhoraram a capacidade humana em reproduzir atividades repetitivas sem afetar o método de projeto. Dessa feita, a lógica aditiva presente nestes sistemas não diferiu quase nada da lógica que acontecia nos processos tradicionais de desenho (figura 31). Isto porque em ambos processos era confiado ao projetista a determinação da consistência global de um projeto, por meio do controle dos *layers* do CAD e da adição consciente de primitivas gráficas através de mediação digital (TEDESCHI, 2014).

Figura 31 – Comparação entre os processos de desenho tradicional e o CAD.



Fonte: Adaptado de Tedeschi, 2014.

Tedeschi (2014) afirmou que o maior progresso na lógica dos processos de projeto arquitetônico iniciou-se a partir dos anos 1980, em virtude de pesquisas acadêmicas e práticas arquitetônicas de vanguarda, quando se buscava fugir das limitações dos softwares, e em virtude disso se explorou a possibilidade de manipular por dentro (a partir da programação) os programas que auxiliavam a composição formal.

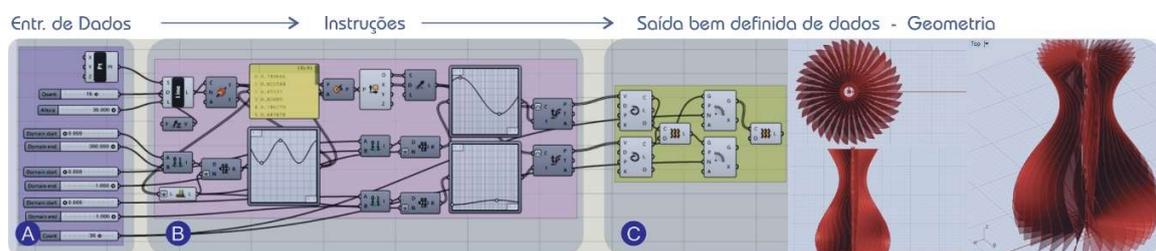
Para o autor, vários foram os projetistas que perceberam que era possível gerenciar a complexidade além das capacidades humanas por meio da estruturação de rotinas e procedimentos, nascia então a Arquitetura Assistida/Auxiliada por Algoritmo (em inglês: *Algorithm Aided Design* — AAD), que utilizava como lógica associativa de desenho o algoritmo para encontrar soluções inovadoras na composição de geometrias não convencionais, uma vez que este método era capaz de gerenciar forças e outras informações intrínsecas do material e do cálculo<sup>51</sup>.

Para Tedeschi (2014, p. 24), “este tipo de modelagem baseia-se em linguagens de programação que expressam instruções de uma forma que pode ser executada pelo computador através de um procedimento passo a passo: o algoritmo”. Henriques e Bueno (2010) complementam o exposto dizendo que o algoritmo corresponde à codificação de um conjunto de regras ou relações lógicas, geométricas e paramétricas, em uma determinada sequência para resolver um determinado problema.

<sup>51</sup> Neste ponto é preciso fazer uma ressalva ao pensamento de Tedeschi (2014), visto que o algoritmo não foi o primeiro processo de projeto a utilizar lógica associativa. Na década de 70 foi inventada a entidade de modelagem *Construct Solid Geometry* (CSG), que era capaz de armazenar algumas informações relacionadas à geometria e topologia (área, massa, volume, momento de inércia, centro de gravidade e a capacidade de avaliar se o modelo é claro e/ou válido) conforme Henriques (2004).

Para ilustrar o processo AAD, Tedeschi (2014) define um algoritmo como um conjunto inequívoco de instruções precisamente definidas (figura 32B), que espera que cada entrada de dado (figura 32A) tenha diferença entre tipo e quantidade (para evitar dúvidas) e que por fim possa gerar uma saída bem definida de dados, como a geometria presente na figura 32C, programada através do Grasshopper.

Figura 32 – Exemplo da lógica associativa de desenho no processo AAD.



Fonte: Autor, 2019.

Terzidis (2006) afirma que o método AAD usa algoritmos para buscar eficiência, velocidade e generalidade ao produzir geometrias computacionais. Tedeschi (2014) por sua vez, afirma que o AAD permite aos projetistas superar as limitações do software CAD tradicional e modeladores 3D, atingindo um nível de complexidade e controle que está além da capacidade manual humana, o que garante aos usuários a exploração de maneira precisa, de formas livres e orgânicas.

Segundo Tedeschi (2014), no AAD os objetos não são manipulados com mouse, mas definidos (abordados) por procedimentos expressos em uma linguagem de programação específica. Essa abordagem (conhecida como *scripting*) é relativamente nova para os projetistas, e estabelece a nova ponte entre ideia (criação advinda do processo cognitivo) e produto. O algoritmo neste ponto se torna a nova mediação entre projetista e projeto.

Armero (2004) afirmou que a arquitetura esperava uma revolução plástica das novas tecnologias e materiais, mas foi através dos novos processos de desenho que a forma conseguiu perder seus contornos e limites, os espaços tornaram-se mais fluidos e

contínuos. Neste novo paradigma a estrutura reticulada perdeu o papel de ordenamento atribuído pelo Racionalismo<sup>52</sup>.

Ao comentar as dificuldades na exploração de geometrias não convencionais, Armero (2004) aponta que nem toda superfície de dupla curvatura trabalha como uma lâmina, e que, por conta disto, a espessura e peso da estrutura serão aumentados exponencialmente caso não haja tamanho, forma e condições adequadas de apoio. A consequência desta hipótese é a predominância dos esforços de flexão.

Foi neste contexto que Cache (1999) afirmou que a matemática havia se tornado um objeto/assistente da fabricação nos anos 1990. O autor aqui se refere à fabricação digital que se tornou possível através das descrições matemáticas (fórmulas) que introduziam as geometrias no computador (assunto discutido no capítulo seguinte) para que fossem fabricadas com o auxílio das máquinas de comando numérico.

Isto posto, a distância entre projeto e fabricação começou a diminuir em virtude da revolução digital (o capítulo quatro aborda especificamente as fases da fabricação na arquitetura). Os computadores forneciam as ferramentas para a ideação e manipulação de formas com matemáticas complexas subjacentes, e então essas novas ferramentas puderam ser aplicadas diretamente à concepção, representação e produção de objetos (CACHE, 1999).

Henriques e Bueno (2010) mostraram as diferentes fases e tarefas em que o computador passou a ser utilizado na arquitetura, tendo, de início, substituído o trabalho mecânico (anos 60 - 70), passando depois a ser uma ferramenta de representação 3D foto realista (anos 80), sempre remetendo à sua capacidade voltada aos processos generativos (*morphing*, modelagem paramétrica, sistemas evolutivos etc); e de associação do

---

<sup>52</sup> O Racionalismo tentou trabalhar uma arquitetura a partir das novas experiências tecnológicas advindas da revolução industrial, onde propagou-se novos princípios tipológicos e o sistema construtivo reticular com vedação independente, conforme Armero (2004).

desempenho, da análise e da fabricação, com a construção na arquitetura através do CAD/CAE/CAM<sup>53</sup> (anos 90).

Neste contexto, é possível perceber que o processo de projeto com mediação digital tem se tornado um tema relevante, estando no cerne da discussão os modelos utilizados e as ferramentas digitais (entidades de modelagem). Isto porque, para que o profissional de arquitetura compreenda os limites da sua expressão projetual (se é que ela existe) é preciso compreender profundamente os elementos intrínsecos aos processos digitais de projeto.

---

<sup>53</sup> Depois do aparecimento das funções paramétricas (1960) tornou-se possível representar e manejar digitalmente formas não convencionais. E foi isto que possibilitou o acesso, “ao cálculo das deformações e dos vínculos, ou dos fenômenos da dinâmica dos fluidos, pelo método dos elementos finitos” (BÉZIER, 1988, p. 10). Foi nesse contexto que foi possível a passagem da fase de desenho ao que o autor chama de verdadeira concepção, o que justificou o aparecimento da sigla CAE ou *Computer Aided Engineering* (Engenharia Assistida por Computador). Como desdobramento disso, foi possível materializar uma forma (já conhecida digitalmente, de maneira exata e completa) produzida por uma máquina de comando numérico; surgindo assim, o processo CAE/CAM— concepção e fabricação assistidas por computador— no qual a segunda sigla no original em inglês remete a: *Computer Aided Manufacturing*. Por último, a gestão da produção que engloba desenho, concepção e fabricação reside dentro do processo conhecido como CAD/CAE/CAM, conforme aponta Bézier (1988).

*To be in control of the process, the designer must be in control of the tools. The tools are computation, [...] be in control [...] or suffer the consequence of the unseen influence of using other people's tools.*

*Mark Burry*

## **Capítulo 3 – Ferramentas digitais**

Neste capítulo são abordados alguns temas relevantes às ferramentas que auxiliam os processos de projetos digitalmente mediados, isto porque a pesquisa entende que ao conhecer melhor estas ferramentas, seja possível catalisar o processo projetivo. Neste sentido, esta parte do trabalho se ocupa em discutir as entidades de modelagem (por conta da sua relação com o processo digital) e a otimização topológica (em virtude de esta ser a ferramenta escolhida para trabalhar com as duas últimas investigações da pesquisa).

Kotnik (2010, p. 3) escreveu sobre a importância da temática quando afirmou que “o propósito da integração de computadores como ferramentas no processo digital de projeto reside na exploração consciente do potencial dos elementos definidores de uma função computável como ferramentas de projeto”, ou seja, reside nas relações compositivas oriundas das propriedades quantificáveis, das quais fazem parte as entidades de modelagem. Tornar-se consciente das propriedades intrínsecas destas entidades é, também, apropriar-se do próprio processo digital de projeto, visto que são interdependentes.

### **3.1 Entidades de Modelagem**

As primitivas gráficas podem ser definidas de acordo com Viera et al (2004) em função das próprias dimensões espaciais daquilo que buscam representar e das configurações (bidimensional ou tridimensional) da própria representação. De modo similar, no contexto da computação gráfica, é possível encontrar a expressão entidade de modelagem, na qual o termo entidade é definida pelo dicionário Michaelis como: existência

independente, separada ou autônoma; aquilo que constitui a natureza fundamental ou a essência de alguma coisa.

Cada elemento geométrico presente em uma entidade de representação é implementado no computador por meio de uma equação que descreve matematicamente sua forma. Este raciocínio pode ou não ser consciente ao projetista, (uma vez que ele pode ser um programador e usuário ou apenas usuário).

Na arquitetura, as primitivas gráficas, ou entidades de modelagem, são as raízes autônomas de desenho capazes de gerar formas. McNeell (2006), por sua vez, apresenta o termo ferramentas de modelagem como outro sinônimo para as expressões já descritas. Esta pesquisa opta por utilizar o vocábulo entidades de modelagem uma vez que trata dos elementos primários responsáveis pela composição formal, num ambiente digital em que modelo, formação e representação são conceitos, em muitos casos, indissociáveis. Neste sentido, ao abordar as entidades de modelagem, este capítulo visa entender as características das ferramentas digitais, conhecer a trajetória histórica presente em sua evolução para então compreender as propriedades intrínsecas ao processo de projeto digitalmente mediado.

### **3.1.1 *Spline***

McNeell (2006) apresenta a *Spline* como uma entidade de modelagem (ou primitiva gráfica, por ser um elemento de transição entre a representação clássica e a digital) que pode ser definida por meio de dois ou mais pontos de controle<sup>54</sup> (figura 33A), e que é capaz de desenhar uma curva suavizada através de uma série de pontos escolhidos. Neste caso, a curva produzida é o resultado da aproximação mais efetiva entre estes pontos (*spline* de

---

<sup>54</sup> Os pontos de controle que ficam na curva são chamados de nós e os demais pontos definem a tangente à curva em seus respectivos nós, conforme McNeell (2006).

aproximação), ou, caso seja possível, é a curva que passa por cima destes mesmos pontos (*spline* de interpolação)<sup>55</sup>.

Deboor (1978) e Farin (2002) apresentaram a trajetória histórica da criação da *spline*. Para Deboor (1978), foi através desta entidade de modelagem que foram representadas, antes da computação, geometrias curvas. O autor pontua que na indústria naval, onde os navios precisavam ser desenhados em tamanho real ou quase real (por conta da dimensão), os desenhos eram produzidos no sótão de grandes edifícios, por um especialista que era conhecido como *loft man*, ou homem do sótão. Ainda segundo o autor, nestes desenhos a curvatura se tornava impossível de ser feita à mão de uma única vez. E por isso empregava-se o uso de tiras longas, finas e flexíveis que poderiam ser feitas de madeira (mais usual), plástico ou metal e eram chamadas de *splines* (figura 33B).

Figura 33: Exemplo de curvas *splines* e processo *lofting* de representação



Fonte: Adaptado de Young, 2011.

Neste processo de desenho descrito por Townsend (2015) como *lofting*, o desenhista escolhia pontos pré-determinados para prender a *spline* com auxílio dos *ducks* ou pesos em português (figura 33C), conforme relata Deboor (1978). Townsend (2015) complementa o exposto dizendo que deste modo produziam-se curvas suavizadas e passíveis de serem variadas em função da posição destes pesos, visto que ao utilizar as

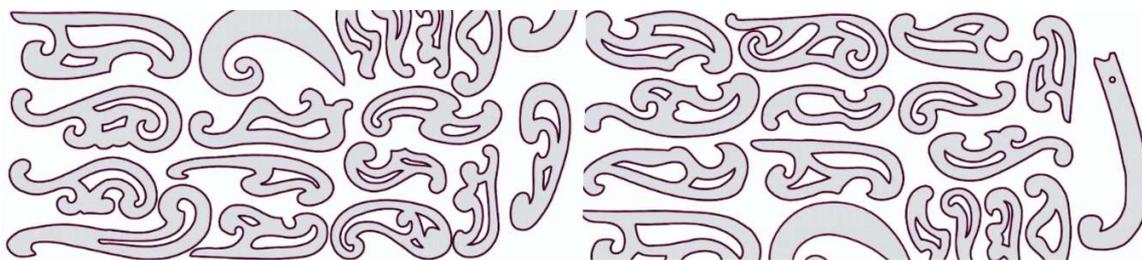
<sup>55</sup> Para fazer uma ligação de dois pontos através de uma curva, um sistema de comando (quando a entidade é usada no meio digital) calcula a posição dos pontos mais próximos. Isto acontece para que a linha quebrada que liga os pontos por interpolação seja indiscernível de uma curva contínua. Quando é dito que uma curva interpola os pontos, significa que ela mesma contém os pontos já escolhidos. E é por isso que muitos autores consideram o *Spline* como um método de interpolação, conforme Bézier, (1993).

propriedades físicas do material (flexão e momento) era possível restringir a *spline* em várias configurações e garantir a suave continuidade entre os componentes.

Embora para Farin (2002) o registro mais antigo do termo *spline* seja de 1752, Townsend (2014) afirma que Palladio (arquiteto renascentista) utilizou uma régua flexível para traçar o perfil curvo das colunas clássicas. Farin (2002), por sua vez, vai além, e diz que o início da era Romana seria o período onde teria ocorrido o uso mais antigo desta primitiva gráfica em um ambiente de produção (construção naval)<sup>56</sup>.

Ainda na trajetória histórica das primitivas gráficas na representação, Townsend (2014) afirma que por volta de 1900 foi publicado pelo geômetra alemão Ludwig Burmester um conjunto padronizado de modelos de curvas livres, conhecidas como curvas francesas (figura 34).

Figura 34: Curvas francesas



Fonte: Adaptado de Townsend, 2014

Townsend (2014) afirma que cada modelo de desenho predefinido desta ferramenta é uma mistura de várias curvas matemáticas. Para utilizar este artefato era preciso encontrar um ajuste próximo à borda da curvatura que servisse ao desenhista e assim garantir a continuidade das curvas tangenciais. Para o autor, antes da computação foram as curvas francesas que possibilitaram o desenho de objetos suaves e irregulares pelas mãos

---

<sup>56</sup> As nervuras de um navio eram concebidas, de acordo com Farin (2002), através de modelos que poderiam ser reutilizados diversas vezes (*splines*), desta forma a geometria básica poderia ser armazenada e não precisaria ser recriada. Para o autor foram os Venezianos que aperfeiçoaram esta técnica do século XIII ao XVI, tornando-se popular na Inglaterra de 1600.

de arquitetos e projetistas. Deboor (1978), por sua vez, mostrou que foi após o advento da computação que as propriedades das *splines* passaram a ser investigadas para que elas pudessem ser inseridas matematicamente no ambiente digital.

Minetto (2003) complementa a discussão ao dizer que a necessidade do estudo das curvas paramétricas<sup>57</sup> advém do fato de que estas não são totalmente geométricas. Nas palavras da autora: “através de uma forma intensamente paramétrica é difícil saber a geometria subjacente que representa sem alguma análise adicional” (MINETTO, 2003, p. 23). Em termos práticos, para conhecer a forma final feita por uma equação matemática é preciso delimitar alguns parâmetros relevantes. Para a autora, os coeficientes das equações que definem as curvas não possuem qualquer significado geométrico. Desta maneira, torna-se quase impossível prever a mudança de forma quando são alterados coeficientes.

### 3.1.2 O algoritmo de Casteljau e a curva Bézier

Young (2011) apresentou a descrição numérica como condicionante da construção gerenciada pela fabricação digital. Segundo o autor, para que qualquer sistema de fabricação digital gerenciasse uma construção seria necessário que este sistema fosse descrito através de números. Neste raciocínio, o autor apresentou a indústria do design automotivo da década de 1960 como sendo a responsável pelas principais etapas tomadas para desenvolver uma descrição numérica apropriada para computação, que pudesse viabilizar a produção de superfícies de forma livre com suaves transições.

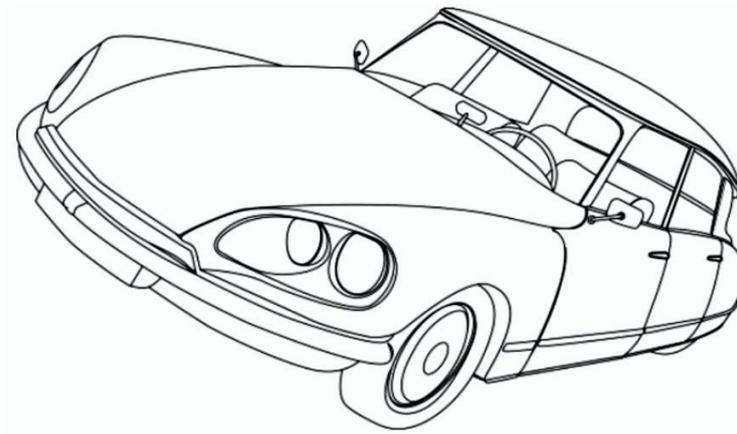
Para Townsend (2014), o percurso da união histórica entre as entidades de modelagem, as curvas computacionais e a indústria automobilística inicia-se um pouco

---

<sup>57</sup> Paramétrico aqui faz referência à inserção de parâmetros para a representação de alguma forma hipotética (que não necessariamente precisa ser implementada pelo computador), quando efetuadas por meio da computação elas são geradas através de uma equação paramétrica que “é aquela em que as coordenadas dos pontos são expressas em função de uma variável comum, que se chama parâmetro” (RANGEL, 1974, p. 16). Esta explicação demonstra como um projetista que trabalhe com este tipo de raciocínio criativo (em um ambiente digital), se beneficiaria do conhecimento dos elementos que se relacionam com a matemática subjacente à forma. Minetto (2003) afirma que estes aspectos (que tangem a matemática subjacente à forma) não eram normalmente considerados pelos desenhistas, projetistas ou usuários de softwares CAD, isto porque eles se preocupavam apenas em conseguir que seus trabalhos fossem realizados.

antes, na década de 1950, com a montadora francesa Citroën e a grande aceitação que a mesma obteve por conta do seu novo automóvel: o DS (em francês é pronunciado do mesmo modo que a palavra deusa: déesse). O autor afirma que o automóvel possuía tecnologia de vanguarda, permitindo que o carro quase flutuasse nas estradas irregulares da França da pós-guerra. E talvez tenha sido este um dos motivos que fizeram o DS 19 (figura 35) receber 743 ordens de compra já nos primeiros 15 minutos em que foi apresentado ao público no salão do automóvel de Paris em 1955.

Figura 35: DS 19 da Citroën



Fonte: Townsend, 2014

Outro fator responsável pelo sucesso de venda do automóvel foi a política da empresa, que buscava inovar em seu processo do projeto, cuja geometria era compartilhada entre várias equipes multidisciplinares que já utilizavam túneis de vento durante a fase de estudos. O corpo do DS foi desenhado por André Lefèbvre, um engenheiro aeronáutico, e, segundo Townsend (2014) o carro foi o primeiro de estilo de 'corpo único' produzido em massa, uma vez que a superfície arredondada de metal suportava carga estruturais.

O autor afirma que as superfícies eram ampliadas manualmente até a escala final, passando por maquetes de argila e depois em desenhos em tamanhos real. Nestes

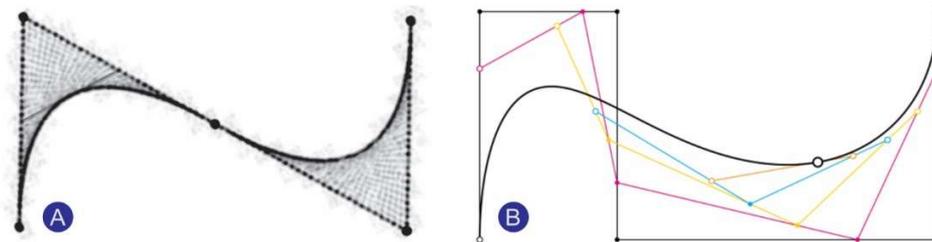
desenhos maiores, os pontos eram plotados após interpolação de curvas francesas ou com auxílio de *splines* flexíveis para chegar à melhor curvatura ajustada à forma final.

A dificuldade da montadora era garantir a mesma geometria para todos os modelos, visto que muito se confiava na habilidade e julgamento dos trabalhadores. Para evitar discrepâncias e erros humanos no processo de montagem, a Citroën e seus concorrentes, com apoio do governo, começaram a adotar os primeiros computadores analógicos com conexão à máquinas de controle numérico que iriam produzir as partes da carroceria feitas de chapas metálicas, conforme menção de Townsend (2014).

Segundo o autor, nestes antigos computadores, linhas, círculos, parábolas e outras funções geométricas regulares eram passíveis de serem inseridas com precisão na máquina, entretanto não existia um método confiável que parametrizasse as curvas e superfícies de formas livres. Townsend (2014) explicou que foi neste contexto que a Citroën contratou em 1959 o matemático Paul de Faget de Casteljaud, para que ele viabilizasse a parametrização destas curvas, para assim, conseguir inseri-las com precisão no ambiente digital.

Young (2011) esclareceu o início do método de Casteljaud dizendo que ele começou com uma construção de uma parábola. O exemplo mais simples (figura 36A) possui dois elementos rígidos e iguais que são ligados na extremidade por uma corda, sendo possível adicionar na extremidade, em sequência, um sistema igual ao primeiro com algum ângulo de rotação. O autor afirmou que esta composição define uma curva parabólica, além de ser também um exemplo de um algoritmo recursivo de interpolação linear repetida.

Figura 36: Exemplo mais simples do algoritmo e método de Paul de Casteljaeu



Fonte: Adaptado de Young, 2011 e Townsend, 2014

Townsend (2014) afirmou que a solução de Casteljaeu (figura 36B) se deu quando ele percebeu que poderia plotar os pontos de uma curva e controlá-los através da manipulação de apenas alguns pontos de influência<sup>58</sup>, o que se assemelharia em grande parte às respostas intuitivas dos pesos que ancoravam as *splines*.

Em 1963 Casteljaeu conseguiu, segundo Townsend (2014), resolver o problema das curvas livres com uma equação de apenas dez linhas (à título de comparação, seus antecessores, mesmo com mais de 60 páginas de cálculo, não tiveram sucesso). Mesmo com a elegante solução, a montadora impediu durante anos que o matemático pudesse publicar suas descobertas, justamente para garantir domínio projetivo sobre as concorrentes, e assim, viabilizar a produção de peças cada vez mais complexas a partir de dados numéricos.

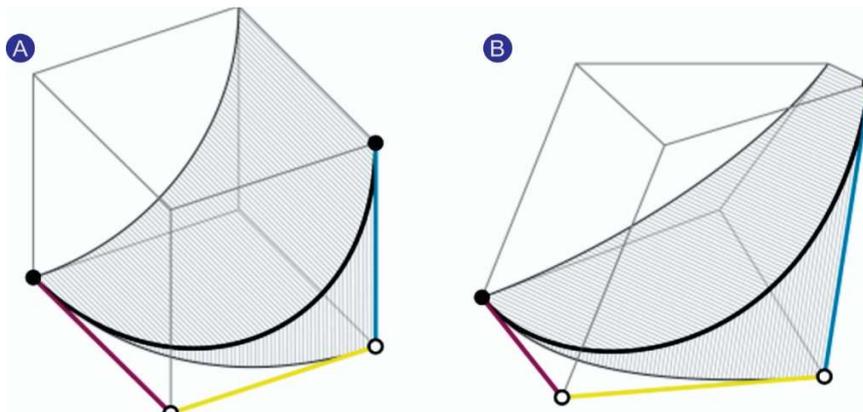
Outra ramificação importante deste relato histórico, segundo Townsend (2014), é a trajetória de Pierre Bézier na Renault na década de 1960. À época, a montadora também buscava dominar as curvas livres e por isso desenvolveu um método (figura 37) para parametrizar estas primitivas gráficas com base na investigação de Bézier, que ao estabelecer a matemática subjacente à forma que investigava, nomeou-a, em 1966, com

<sup>58</sup> Pontos de influência são ligados para formar linhas de controle (*courbes à pôles*). Estes pontos são gerados (figura 36B) a distâncias proporcionais (2/3 do caminho) e ao longo de cada um desses polos (pretos), novas linhas (rosa) conectam esses pontos e, mais uma vez, um novo conjunto de pontos é criado na mesma distância proporcional ao longo deles. Novos polos e pontos são gerados até um ponto final. Matematicamente, o processo pode ser repetido infinitamente em todos os intervalos, resultando suavidade à curvatura (TOWNSAND, 2014). Para o autor, o algoritmo proposto por Casteljaeu foi baseado na retro avaliação do polinômio de Bernstein.

seu próprio sobrenome (curva Bézier). Ao contrário da Citroën, a Renault permitiu a publicação do trabalho de seu funcionário.

As curvas eram geradas pela interseção de duas superfícies cilíndricas. A geometria resultante da interseção (dentro do cubo, figura 37A) é passível de ser definida matematicamente, e assim quando se realiza uma transformação no cubo, a curva interna também é remodelada (figura 37B). Por este método era necessário manipular apenas três vetores (rosa, azul, amarelo) para construir as curvas, conforme aponta Townsend (2014).

Figura 37: Método de Bézier



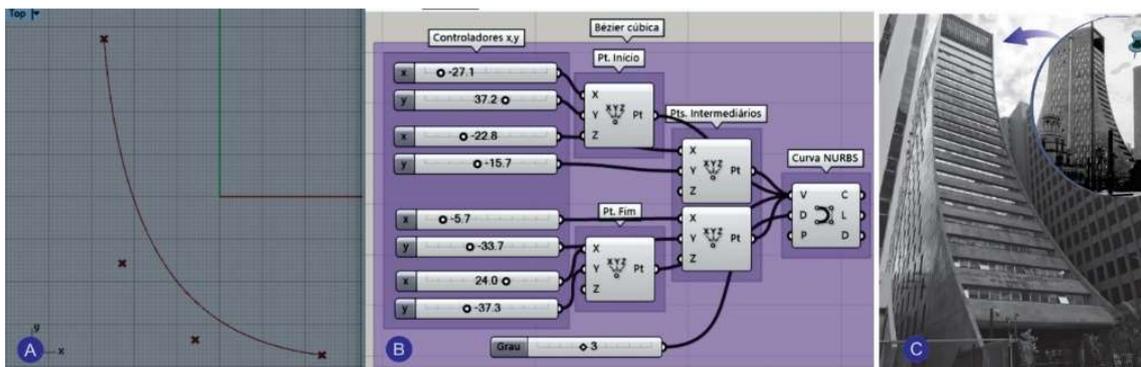
Fonte: Adaptado de Townsend, 2014

O grau<sup>59</sup> que se recebe em uma curva Bézier é o número de pontos de controle menos um, ou seja, uma Bézier cúbica (terceiro grau) tem 4 pontos de controle (figura 38A). O processo AAD de construção desta curva é apresentado na figura 38B e um exemplo arquitetônico, em que parte da forma pode ser representada por esta entidade de modelagem é apresentado na figura 38C, figurando o edifício Torre Paulista (figura 38C), de

<sup>59</sup> Refere-se ao exponencial mais alto na equação da curva, onde se ela for de grau 1 será uma linha reta, grau 2 será uma curva quadrática (cônica), grau 3 será uma curva cúbica e assim sucessivamente. Uma observação pertinente é que o grau da curvatura não pode ser superior aos lados do polígono de controle determinado pelos pontos de controle de uma curva. Ressalta-se também que os nós são usados para controlar a continuidade geométrica (YOUNG, 2011).

autoria de Jorge Zalszupin, José Gugliotta e José Maria de Moura Pessoa, construído em 1972 e localizado na avenida Paulista em São Paulo.

Figura 38: Exemplo de utilização de curva Bézier cúbica



Fonte: Autor, 2019

### 3.1.3 *B-Splines* e o processo da General Motors (GM)

As entidades de modelagem se diferenciam quanto às suas características, domínio, trabalhabilidade e superioridade. Neste sentido quando comparada à uma *B-spline*, uma curva Bézier tem menos pontos de controle, o que demonstra como uma entidade pode ser superior à outra.

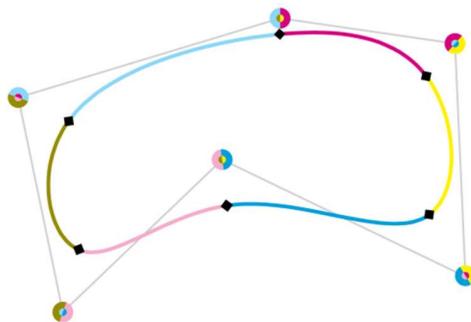
Townsend (2014) afirma que em 1959 a GM se encontrava em uma situação semelhante à de suas concorrentes francesas, visto que a empresa também havia adquirido máquinas de controle numérico e não tinha uma linguagem matemática para inserir as formas não convencionais dos seus automóveis. Foi então que Carl de Boor, pesquisador da GM, desenvolveu um método para avaliação destas curvas cujo nome ficou conhecido como *B-splines*. O autor relata que o método possuía uma função matemática concebida pela primeira vez na década de 1940, e que foi graças à velocidade recursiva da computação que a GM conseguiu desencadear o controle superior e a flexibilidade das *B-splines*, cuja formulação matemática foi estabelecida por Boor em 1972.

Para Young (2011) as *Bases Splines (B-splines)* podem ser definidas como várias curvas Bézier unidas em nós uniformes (uma curva dividida em vários fragmentos). A curvatura é suave no nó, pois o final de uma curva compartilha tangência e comprimento do vetor com o início do próximo, criando continuidade paramétrica.

Townsend (2014) explica que na *B-spline* as subcurvas sobrepostas são cortadas e amarradas em intervalos uniformes, chamados de "nós" e que o 'B' em *B-spline* relaciona-se às suas múltiplas funções de base. Foi neste contexto que a GM criou o seu primeiro sistema CAD/CAM DAC (*Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing Design Augmented by Computer*) conforme Farin (2002).

Townsend (2014) afirma que cada segmento de base compartilha todos os pontos de controle, exceto um, com os segmentos adjacentes. Na figura 39 é possível observar uma *B-Spline* cúbica fechada na qual os seis segmentos de curva são controlados por quatro pontos (para mostrar a quantidade de influência apresenta-se a área relativa de cor em cada ponto de controle).

Figura 39: *B-spline* cúbico fechado

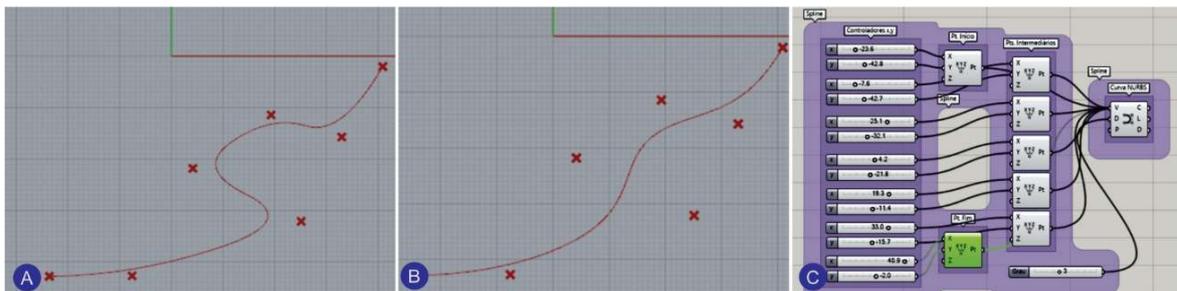


Fonte: Townsend, 2014

Nesta entidade de modelagem é possível mudar o grau da curvatura, sem mudar o número de pontos de controle como é possível observar na figura 40, que apresenta exemplos de curvas *b-splines* que variam apenas em grau (quanto maior o grau da bézier,

menor a influência do ponto de controle na sua vizinhança, pois este “poder” é dividido entre os demais pontos).

Figura 40: Exemplo de *b-spline* representada por AAD



Fonte: Autor, 2019

Na figura 40A é possível ver uma *B-Spline* do segundo grau com 5 pontos de controle, o programa calcula mais dois pontos (para as emendas) e cria uma curva igual a 3 curvas Bézier do segundo grau unidas com continuidade e raio de curvatura. A figura 40B apresenta uma *b\_spline* do 5º grau, a curva utiliza os mesmos pontos de controle da figura 40A e o processo AAD é ilustrado na figura 40C. Townsend (2014) afirma que uma *B-spline* possibilita controle local sobre uma região quando os pontos de controle são deslocados, mas sem alterar outras partes da curva. Deste modo, esta entidade de modelagem tem maior precisão e controle quando comparada com as antecessoras<sup>60</sup>.

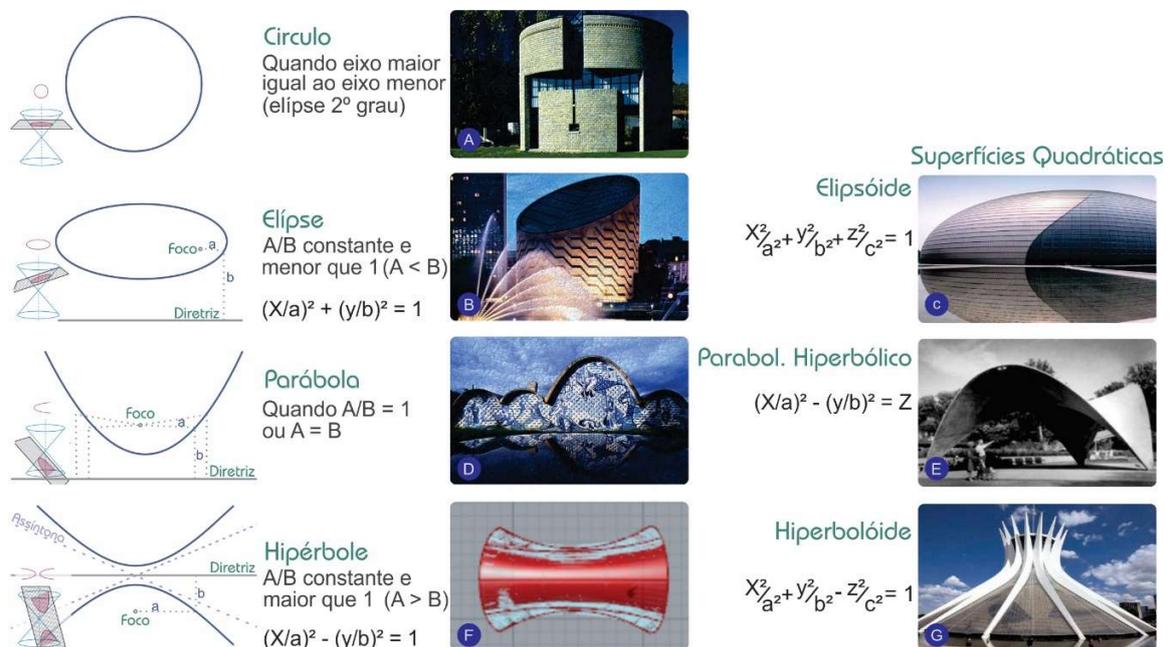
### 3.1.4 As cônicas de Liming

Na indústria aeronáutica a curvatura é um tema de extrema relevância em virtude dos esforços dinâmicos que podem afetar a aerodinâmica do projeto. Neste sentido,

<sup>60</sup> Townsend (2014) afirma que a maioria dos programas que trabalham com curvas Bézier (Adobe Illustrator, CorelDraw etc) usam curvas de grau 3 (bézier cúbicas) pois com o aumento do grau a edição da curva vai ficando mais difícil, uma vez que a movimentação de qualquer um dos pontos de controle afeta toda a curva e não apenas a região próxima ao ponto de controle. Para evitar este problema, é possível usar uma *b-spline*, que usa a união automática de várias Béziers de baixo grau.

Townsend (2014) afirmou que os primeiros engenheiros aeronáuticos utilizavam técnicas navais adaptadas para representar curvas em asas e fuselagens. Além de *splines* e curvas francesas, os projetistas utilizavam construções geométricas clássicas datadas de 1600 (embora início do estudo tenha ocorrido em 300 d.C.): as curvas cônicas ou, seções cônicas recebem este nome por serem obtidas através do corte de um cone por um plano produzindo assim parábolas, hipérboles, elipses e círculos (figura 41).

Figura 41: Exemplos de curvas cônicas



Fonte: Adaptado de Townsend, 2014

Para conseguir compreender e diferenciar a construção das seções cônicas é preciso imaginar um plano, uma reta qualquer (diretriz) e um ponto fora desta reta (foco). Com um outro ponto qualquer (P), é possível ter: A = distância entre P e o foco; e B = distância entre P e a diretriz. A figura 41 demonstra exemplos geométricos das curvas cônicas e suas ramificações de superfícies quadráticas<sup>61</sup>:

<sup>61</sup> Superfícies quadráticas são superfícies que quando seccionadas apresentam curvas cônicas. As superfícies quadráticas podem ser regradas (passíveis de serem construídas com a revolução de apenas uma cônica), ou

Ainda sobre o percurso histórico da evolução das entidades de modelagens, Townsend (2014) afirma que os projetistas desenhavam as seções transversais de uma fuselagem de avião colocando em sequência segmentos cônicos. Para encaixar e conectar os pontos traçados, ainda era necessário a ajuda de curvas francesas, garantindo suavidade na transição entre as curvaturas.

O problema, segundo o autor, consistia em, durante a segunda Guerra Mundial, desenhar aviões em hangares: atividade que se tornou uma responsabilidade estratégica, haja vista que uma única bomba seria capaz de destruir os modelos vitais usados para desenhar um avião, ou então os desenhos poderiam ser roubados e/ou fotografados por espiões.

Buscando então tornar criptografada a documentação necessária para construção dos aviões, o engenheiro aeroespacial Roy Liming que trabalhava para a aviação norte americana durante a Segunda Guerra Mundial (posteriormente trabalhou para a Boeing) converteu as curvas cônicas paramétricas em algorítmicos<sup>62</sup>, conforme Townsend (2014), que complementou dizendo que com o resultado deste processo, era possível armazenar numericamente em tabelas não ambíguas a geometria essencial de cada avião, eliminando assim as interpretações individuais dos desenhos.

A vantagem era que os números podiam ser armazenados com segurança além de possuir facilidade de transmissão, sem contar a eficiência, precisão e reprodutibilidade adquiridas. Farin (2002) relata que em 1950, o trabalho de Liming foi amplamente adotado

---

duplicamente regradas (com a revolução de duas cônicas). A figura 41A apresenta a Casa Redonda (1980), de Mario Botta, em Ticino, na Suíça. Embora o volume seja um cilindro, a planta baixa foi desenvolvida à partir de um círculo. Em sequência, veremos em 41B o planetário de Tycho Brahe (1988), de Knud Munk, em Copenhague, na Dinamarca, que, mesmo possuindo um como volume parte de um cilindro, possui uma cobertura consistente em uma elipse por conta do ângulo). Podemos observar também o Grande Teatro Nacional da China (2007) de Paul Andreu, em Pequim, na China (41C); a igreja de São Francisco de Assis (1943), de Oscar Niemeyer, em Belo Horizonte (41D); o clube noturno *La Jaracanda* (1957), de Félix Candela em Acapulco, no México (41E); uma exploração morfológica de base hiperbólica (2019) do autor (41F); e a Catedral Metropolitana de Nossa Senhora Aparecida (1970), de Oscar Niemeyer, em Brasília (41G).

<sup>62</sup> Em 1944, Liming escreveu o livro *Analytical Geometry with Application to Aircraft* (Geometria analítica com aplicações em aeronaves), neste trabalho pela primeira vez foram combinados métodos clássicos de desenho com técnicas computacionais, conforme Farin (2002).

pelas empresas de aviação dos EUA. Townsend (2014) afirmou ainda que os empreiteiros privados aeroespaciais, como a Boeing<sup>63</sup>, continuaram usando as fórmulas para as cônicas de Liming, mesmo após a guerra.

Farin (2002) afirmou que as abordagens industriais (aeronáutica e automobilística) sobre as entidades de modelagem que ocorreram na década de 1960 começaram a ter uma confluência, em 1970, de diferentes áreas científicas e culminaram na criação da disciplina *Computer Aided Geometric Design* (CAGD), que versa sobre a matemática subjacente à forma, além de análise numérica, estrutura de dados e álgebra computacional para uso da computação gráfica.

### 3.1.5 Superfícies paramétricas

Para Stroud (2006), a modelagem geométrica de objetos pode ser compreendida como a representação, por meio de softwares, de objetos físicos para qualquer propósito. Entretanto, o autor defende que esta seria uma definição deliberadamente vaga, em virtude das mudanças ocorridas ao longo dos anos nos meios de representação e nos propósitos destas representações (como já abordado no capítulo anterior).

Os modelos físicos foram substituídos por modelos digitais por meio da mediação computacional, e assim surgiram os modelos de arame (*wireframe*) com representação através de linhas e nós no início dos anos 60, conforme Stroud (2006), que complementa o exposto ao dizer que este sistema de desenho era capaz de “tornar o processo de design mais eficiente”, embora fosse utilizado, essencialmente, como prancheta eletrônica.

Stroud (2006) ressalta que as lacunas (superfícies) entre as linhas representadas também eram importantes, e por isso, durante os anos de 1960 a 1970 foram desenvolvidos sistemas para representar superfícies, com o intuito parcial de “gerar automaticamente o

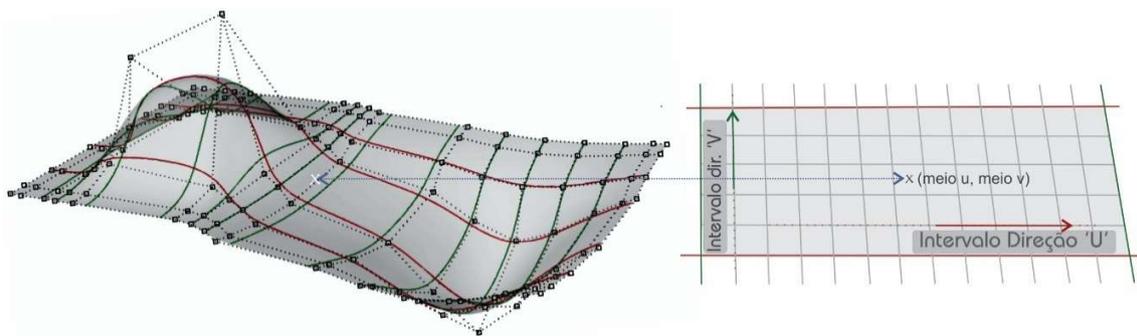
---

<sup>63</sup> Em 1950 a Boeing já tinha desenvolvido seu próprio software para desenho de fuselagens, isto porque existiam variáveis específicas às aeronaves, como o design da asa que necessitava de curvas contínuas para análise aerodinâmica, como apontou Townsend (2014).

código de controle numérico para usinagem de formas complexas para aeronaves e carros” (STROUD, 2006, p. 18).

Issa (2013) explica o exposto ao dizer que uma superfície paramétrica pode ser definida em função de dois parâmetros ( $u$ ,  $v$ ) que são independentes e dominam alguma região bi ou tri dimensional. Neste intervalo de parâmetros é possível avaliar (encontrar ou desenhar) um ponto 3D nessa superfície. Importante ressaltar que um ponto no meio do domínio ( $u$ ,  $v$ ) não necessariamente se encontra no meio do domínio da superfície representada conforme demonstra figura 42:

Figura 42: Demonstração divisão  $u$ ,  $v$  de uma superfície



Fonte: Adaptado de Issa, 2013

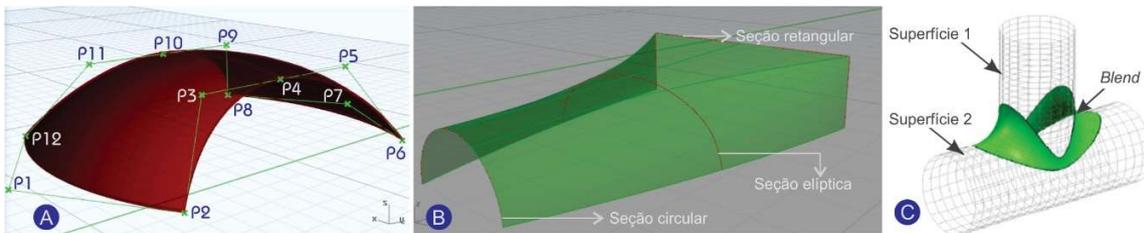
Para Issa (2013), é possível definir a forma de uma superfície através do número de pontos de controle e o grau dessa superfície em cada uma das duas direções ( $u$ ,  $v$ ). A figura 42 apresenta as isocurvas<sup>64</sup> verdes na direção ' $v$ ' e vermelhas na direção ' $u$ '.

Henriques (2004) estabeleceu apontamentos relevantes nesta temática. Segundo o autor, a superfície plana é a superfície mais elementar, e pode ser definida por meio de duas linhas paralelas, uma linha e um ponto ou por apenas três pontos. Existem ainda para o autor três categorias principais capazes de definir superfícies: determinadas por pontos de controle (figura 43A), onde as superfícies são geradas ao passar pelos pontos, ou após

<sup>64</sup> McNeell (2006) afirma que uma isocurva (também conhecida como curva isoparamétrica) é uma curva que possui valor  $u$  ou  $v$  constante em uma superfície. Existem programas de modelagens que criam modelo *wireframe* através de isocurvas e também curvas de borda de superfície.

interpolá-los; podem também ser definidas a partir de curvas de controle, conforme figura 43B; e por último, podem ser geradas também por meio da interpolação entre superfícies (figura 43C), fenômeno este que acontece nos arredondamentos ou *blends*, em inglês.

Figura 43: Formações usuais de superfícies



Fonte: Adaptado de Henriques, 2004

Henriques (2004) afirmou que ao se levar em consideração todo o processo de fabricação de um produto hipotético, este método de modelagem apresenta limitações, visto que “somente representa o modelo por intermédio de sua superfície, não levando em consideração seu volume que é requerido para várias aplicações ao longo do desenvolvimento do produto” (HENRIQUES, 2004, p. 11). Para o autor as limitações deste processo de modelagem são:

- Não existe mecanismo que impeça a construção de modelos ambíguos ou com erros; e
- podem haver cruzamentos da superfície com outra ou com ela mesma (superfícies descontínuas).

### 3.1.6 CSG e *B-Rep*

Foi por conta da problemática supracitada que Hsu (2010) afirmou que os modelos *wireframe* e de superfície eram incapazes de verificar se uma representação 3D estava bem formada (se dois objetos ocupavam ou não o mesmo espaço) e possuíam dificuldade de

trabalhar o endereçamento espacial<sup>65</sup>. Visando solucionar estes problemas, surgiram as técnicas de modelagem de sólidos baseada em representação de informações completas e não ambíguas, capazes de armazenar mais informações (geometria e topologia) do que os modelos de arame e superfície (que armazenam somente geometria). A figura 44 apresenta as informações que existem ou que podem ser determinadas em qualquer instante da modelagem de sólidos, em comparação aos modelos *wireframe* e de superfície.

Figura 44: Características presentes nos métodos *wireframe*, superfície e sólido

Tipos de Representação	Claro	Válido	Área	Vol.	Massa	Mom. Inércia	C.G.
Wireframe	X	X	X	X	X	X	X
Superfície	X	X	✓	X	X	X	X
Sólidos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Adaptado de Henriques, 2004

Henriques (2004) afirma que o desenvolvimento dos modeladores sólidos começou na década de 70 por meio de duas linhas de trabalho: os pesquisadores Voelcker e Requicha, da Universidade de Rochester, introduziram os modelos de Geometria Sólida Construtiva ou *Constructive Solid Geometry (CSG)*<sup>66</sup>, enquanto as representações de fronteira, do inglês *Boundary Representations (B-Rep)*, foram desenvolvidas na Universidade de Cambridge por Ian Braid e Bruce Baumgart. Os dois métodos tornaram-se

<sup>65</sup> Hsu (2010) explica que o endereçamento espacial é a análise que ocorre entre o objeto representado e o espaço que permite avaliar se os pontos espaciais em estudo se encontram dentro, fora ou no próprio objeto representado. Isto porque a representação dos dados geométricos de um objeto é o que permite que pontos no espaço sejam classificados em relação ao próprio objeto.

<sup>66</sup> No método CSG os objetos são gerados através de combinações de sólidos primitivos (esfera, cubo, cilindro etc). As combinações dos sólidos ocorrem por meio de operações booleanas (união, subtração e intersecção), conforme Henriques (2004). Para o autor, esta modelagem tende a ser mais ágil e simples, além de possuir menos erros numéricos ou computacionais. A dificuldade do método acontece com as geometrias complexas visto que são impossíveis de serem modeladas usando o CSG. Outra restrição do método é a dificuldade de incorporação de superfícies ao modelo por meio de CSG.

comerciais no final da década de 70<sup>67</sup> e início da década de 80. Isto posto, Stroud (2006) afirmou que as principais técnicas de representação na modelagem de sólidos são:

1. Decomposição de células: representa explicitamente o material do qual o sólido é composto, e assim divide o espaço em um conjunto de elementos, onde cada um é cheio de material;
2. Varredura geral: representa objetos em termos de formas bidimensionais que são extrudadas ao longo de curvas gerais;
3. Teórica do conjunto: para o autor existem duas variantes, uma que representa os sólidos como combinações de formas primitivas (CSG) e a outra representando os objetos por meio de um conjunto de superfícies que delimitam o objeto; e
4. Representação de fronteira: representa a "pele", o limite entre modelo e não-modelo.

Para explicar as representações de fronteira, Hsu (2010) afirmou que elas podem ser entendidas como uma superfície contínua completamente fechada<sup>68</sup>, uma borda que define um sólido. Santos (2003) afirma que a *B-Rep* produz um objeto tridimensional por meio de seus elementos fronteiros (faces, vértices e arestas). Neste método representativo existe hierarquia implícita na estrutura de dados. Isto pode ser compreendido quando se entende

---

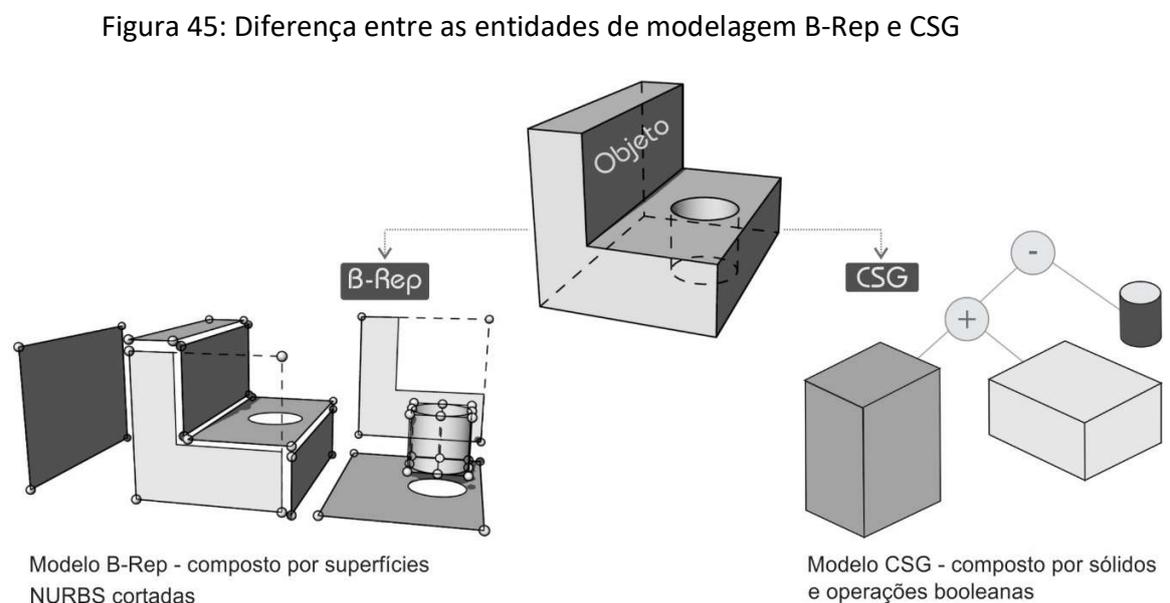
<sup>67</sup> Neste ponto da discussão é possível perceber que a lógica associativa (que carrega informação no processo de projeto AAD), possibilitada, segundo Tedeschi (2014), pelo advento do algoritmo, já podia ser encontrada comercialmente (embora viabilizasse poucas informações adjacentes), no final da década de 70 por meio dos modeladores sólidos. Esta ressalva é importante visto que contraria, em partes, o pensamento de Tedeschi (2014) que defende o algoritmo como primeiro processo projetivo por meio de lógica associativa. Outro fato que deve ser apontado é que estes tipos de modeladores (sólidos) foram mais utilizados por designers e engenheiros do que por arquitetos e urbanistas; que em números gerais, preferem trabalhar mais com o AAD (Rhinceros + Grasshopper ou Revit + Dynamo) do que com modeladores sólidos em seus processos de projeto digitalmente mediados.

<sup>68</sup> Múltiplas superfícies (*polysurfaces*) NURBS unidas entre si são também entendidas como B-Rep. Nestes casos, cada superfície tem sua própria estrutura, parametrização e direções em relação às isocurvas que não precisam corresponder umas às outras. Objetos *B-Rep* são chamados de sólidos quando possuem geometria completa e fechada (ISSA, 2013).

que um objeto hipotético é definido pelas suas faces (planos), assim como “as faces pelas suas arestas (linhas), e as arestas pelos seus vértices (pontos), e estes, pelas suas coordenadas (X, Y, Z)” conforme (SANTOS, 2003, p.75).

Hsu (2010) afirma ser crucial a distinção entre a representação de dados internos de um determinado sistema CAD/CAM e interface do usuário. Isto porque é possível que um sistema que utilize a entidade de modelagem *B-Rep* como representação de dados internos utilize também uma interface de usuário orientada por CSG, onde um modelo seria inserido no sistema por primitivas sólidas.

Para Santos (2003) e Van Den Heuvel (2000), a diferença entre *B-Rep* e CSG é que na primeira entidade é possível produzir um modelo através de superfícies, além de também ser possível produzir este mesmo objeto por meio de sólidos. À contramão, na representação através de CSG a modelagem acontece apenas por sólidos como demonstra a figura 45.



Fonte: Adaptado de Breitenberger, 2016

Para Henriques (2004), uma das preocupações da *B-Rep* é garantir que um modelo seja topologicamente válido, e isto pode ser feito em dois passos: através da escolha da estrutura de dados apropriada; e assegurando a consistência topológica do modelo (regras matemáticas que controlam a topologia), como a equação de Euler ( $f - a + v = 2$ ), onde 'f' é o número de faces, 'a' o número de arestas e 'v' o número de vértices. O autor finaliza dizendo que o modelo *B-Rep* concede vantagens de performance, visto que as informações relevantes do projeto podem ser extraídas diretamente do banco de dados para outras aplicações de engenharia.

Como exemplo de arquitetura cujo processo de projeto pode ter utilizado sólidos durante sua concepção, pode-se citar a casa de hóspedes (figura 46A) de Mike e Penny Winton (*Winton guest house*), concebida por Frank Gehry, conforme Winterer (2015). De acordo com Porttman et al. (2007) a inspiração para Gehry veio das pinturas de Giorgio Morandi e, segundo os autores, a ideia do arquiteto era conceber a casa de hóspedes como uma grande escultura ao ar livre na qual cada ambiente poderia ser visto como seu próprio 'mini edifício' (figura 46B). Quando foi concluída em 1987, a estrutura de 2.300 metros quadrados ganhou o prêmio de design da revista *House and Garden* do mesmo ano.

Figura 46: *Winton guest House* como exemplo de arquitetura concebida por sólidos



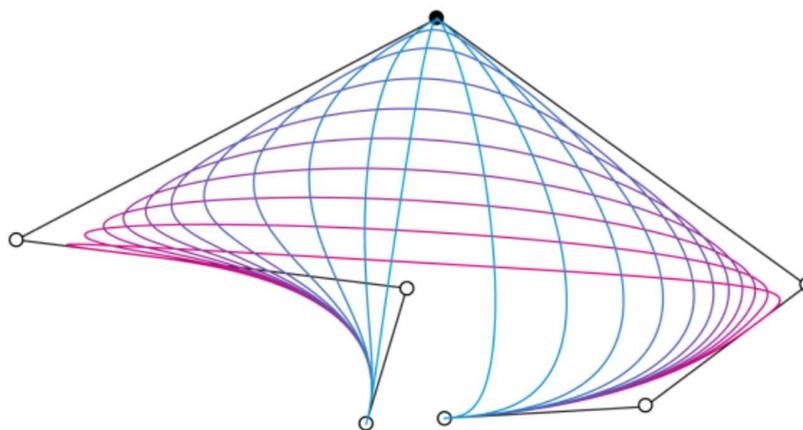
Fonte: Adaptado de Winterer, 2015

### 3.1.7 NURBS

Em 1979 a Boeing nomeou um grupo de matemáticos com a incumbência de selecionar uma representação padrão para onze formas curvas, tais como círculos, curvas Bézier e *B-splines*, conforme apontou Townsend (2014). O intuito da empresa era sanar os problemas de incompatibilidade sistêmica em seus projetos e, assim, padronizar as entidades de modelagem para que as equipes colaborassem e coordenassem de modo eficiente os aspectos relacionados a geometria, software e design.

O autor complementa o exposto quando diz que os matemáticos conceberam<sup>69</sup> as curvas de Bézier racionais (racional porque o “peso” de cada ponto de controle poderia variar). Na figura 47 é possível observar um exemplo de geometria produzida por NURBS, onde os pontos de controle racionais podem ser ponderados individualmente. Neste exemplo os pesos dos pontos pretos variam de 0,001 (gradação rosa) à 1.0 (gradação azul).

Figura 47: Exemplo NURBS



Fonte: Townsend, 2014

---

<sup>69</sup> Townsend (2014) afirmou que a Boeing conseguiu incorporar em sua representação o *B-Spline* não uniforme (entidade de modelagem cujos os “nós” não estão uniformemente espaçados ao longo da curva), pois alguns anos antes os doutorandos da Universidade de Siracusa expandiram o modelo de *B-Spline* para serem racionais e não uniformes. Com este avanço a empresa era capaz de introduzir cantos afiados dentro da *spline*, colocando múltiplos nós em um local e assim, fixar a curva neste ponto.

Foi neste contexto que Townsend (2014) afirmou que, em 1981, a Boeing desenvolveu um novo modelo geométrico que poderia abranger todas as necessidades da empresa, desde linhas e círculos simples até as curvas e superfícies de forma livre e complexas: nascia então a representação matemática *Non-Uniform Rational Basis Splines*, ou NURBS, cuja tradução em português seria curvas de base *splines* racionais não-uniformes.

Para Piegl e Tiller (1997), as curvas e superfícies NURBS acabaram tornando-se o padrão<sup>70</sup> da indústria em assuntos de representação, projeto e troca de informações de dados geométricos processados por computadores. Isto porque esta entidade de modelagem é capaz de representar com precisão diversas geometrias, constituindo assim um formato único de representação matemática de primitivas geometrias.

Uma forma mais simples de explicar e entender a diferença entre as curvas Bézier, *b-spline* e NURBS é que nas curvas Bézier e *b-splines* os pontos de controle têm o mesmo "peso" (exercem a mesma força na hora de controlar a suavidade da curva, vem com o valor automático de 1 unidade, mas podem ser alterados); já com as NURBS, um ou mais pontos de controle tem que ter pesos diferentes. Com curvas Bézier é possível desenhar uma parábola com perfeição, mas não é possível desenhar círculos, elipses e hipérbolas perfeitas, fato este que pode ser solucionado com a utilização de curvas NURBS<sup>71</sup>.

---

<sup>70</sup> O sucesso desta entidade de modelagem acontece porque: as NURBS originam-se de uma base matemática, e podem representar diversas formas analíticas (seções cônicas, superfícies quadráticas, formas livres etc); as curvas NURBS permitem representar formas arbitrárias, enquanto mantém exatidão e independência de resolução matemática; um projeto que utiliza esta entidade de modelagem é intuitivo (fácil entendimento de interpretação geométrica); os algoritmos NURBS são numericamente estáveis e rápidos, (as curvas e superfícies desta entidade não variam após transformações geométricas comuns) e também porque as NURBS podem representar formas complexas, através de poucos dados, conforme Piegl e Tiller (1997).

<sup>71</sup> O que importa nesta entidade de modelagem é a razão (proporção) entre os pesos dos pontos, ou seja, em uma NURBS de 3 pontos com pesos 1, 2 e 3 é igual à uma NURBS com os mesmos pontos de controle, porém com pesos 4, 6 e 12, uma vez que o peso do segundo ponto de controle é o dobro do primeiro e o terceiro é o triplo do primeiro. Justamente por isso que essa unidade de representação é denominada com a sigla NURBS ou entidade de modelagem do tipo *B-Spline*, onde as razões entre os pesos não são uniformes. Neste contexto, Issa (2013) afirma que com o *software Rhinoceros* e o *plug-in Grasshopper* é possível trabalhar com qualquer grau de curvatura (começando com 1). Para o autor os graus mais úteis são o 1, 2, 3 e 5, visto que os graus 4 e os acima de 5 não são usuais no mundo real. Isto posto, linhas e poli linhas são representadas através de NURBS de grau 1, círculos e elipses por meio de NURBS de grau 2 e curvas de formas livres, normalmente são representadas por curvas NURBS de grau 3 ou 5.

Um exemplo da utilização desta entidade de modelagem no processo projetivo é a Villa Nurbs (figuras 48A e B) construída em 2008 e projetada por Enric Ruiz-Geli em Empuriabrava, na costa de Girona, na Espanha.

Figura 48: Villa NURBS



Fonte: Adaptado de Ruiz-Geli, Amat e Cumella, 2017

McGuirk (2011) afirma que o arquiteto estava interessado apenas em concursos internacionais, e para dissuadir um casal de amigos de sua mãe da ideia de trabalhar com ele, por meio do estranhamento de sua proposta, apresentou uma série de fotos de cubos de gelos derretendo. Os proprietários escolheram uma das fotos e então, Ruiz-Geli acatou e achou que seria interessante explorar uma nova morfologia para a habitação. McGuirk (2011), em uma entrevista com Ruiz-Geli, afirma que a ideia original do arquiteto era de uma série de pavilhões separados, entretanto durante a exploração morfológica, todos se reuniram em uma estrutura organizada em torno da piscina. O autor afirma que como esta não era uma casa padronizada<sup>72</sup>, as janelas (figura 49A) levaram quase dois anos para serem fabricadas e as paredes de vidro ao redor da piscina quebraram várias vezes antes de conseguirem ser instaladas.

---

<sup>72</sup> McGuirk (2011) questiona a falta de padronização e a falta de velocidade no processo construtivo. Segundo o autor, Ruiz-Geli acredita que as máquinas podem resolver isso (ele trabalha com a perspectiva da construção de fábricas que possam construir edifícios). Curiosamente, a construção dessa edificação (uma das primeiras que ele define como casas digitais, em função do alto índice de fabricação digital presente no processo construtivo) tem mais relação com o artesanato (escultor) do que com a própria fabricação digital.

Figura 49: Villa NURBS



Fonte: Adaptado de Ruiz-Geli, Amat e Cumella, 2017

De acordo com Ruiz-Geli, Amat e Cumella (2017) a Villa NURBS apresenta formas que se assemelham a ondas, onde são utilizados painéis cerâmicos (figura 49B) para proteção solar. Estas cerâmicas foram produzidas por meio de moldes que foram fabricados digitalmente (a geometria das peças foi desenvolvida através de um modelo virtual que serviu para fresar as peças de madeira).

### 3.1.8 *T-splines*

Sederberg e Sederberg (2010) afirmam que a formulação NURBS possui três pontos negativos que podem afetar o processo de projeto na indústria naval<sup>73</sup>: o primeiro é que NURBS possuem topologia retangular, assim, ao projetar uma geometria curva e representá-la como uma única superfície, é possível facilitar o processo de análise e otimização além de minimizar a probabilidade de erros no modelo, por outro lado; a topologia de base retangular desta entidade nem sempre consegue representar uma geometria complexa como uma única superfície, podendo gerar erros de precisão ou micro lacunas entre as faces.

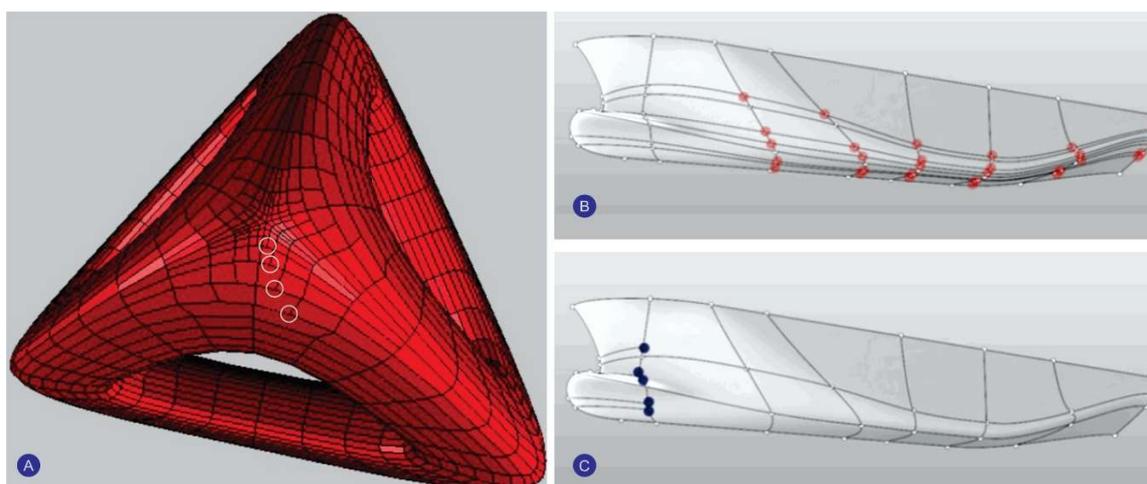
O segundo ponto negativo apresentado por Sederberg e Sederberg (2010) é que uma quantidade considerável de pontos de controle na entidade NURBS são supérfluos,

<sup>73</sup> Os autores aplicaram a discussão nesta indústria, entretanto o assunto pode ser considerado pertinente para qualquer área que utilize NURBS no processo digital de projeto.

isto porque os pontos desta entidade devem estar topologicamente em uma grade retangular. Sendo assim, estes pontos existem para satisfazer restrições topológicas e não contêm informações geométricas significativas. Os autores ressaltam que pontos de controle supérfluos são inconvenientes visto que exigem o processamento de uma maior quantidade de dados. O último ponto negativo na utilização de NURBS para a indústria naval apresentado pelos autores é que superfícies NURBS cortadas ou aparadas não são matematicamente estanques.

Visando solucionar estas deficiências nas representações através de NURBS, Sederberg et al. (2003) apresentaram uma nova formulação matemática: as *T-splines* ou superfícies NURBS com junções “T”. A figura 50A apresenta uma geometria representada por *T-splines*, na qual as regiões assinaladas por círculos demonstram linhas de pontos de controle que não precisam atravessar toda a malha da geometria (quando observada apenas a região de interrupção da isolinha, a mesma forma uma figura que se assemelha a um ‘T’, de onde advém o nome<sup>74</sup>). Esta particularidade desta permite maior controle através de um refinamento local na malha, conforme Sederberg et al. (2003) ano em que os autores apresentaram a primeira publicação sobre *T-splines*.

Figura 50: Exemplos de geometrias produzidas por *T-splines* e NURBS



Fonte: Adaptado de Sederberg *et al.*, 2003 e Sederberg e Sederberg, 2010

<sup>74</sup> A malha de controle em uma superfície *T-spline* é chamada de malha-T, (*T-mesh*), conforme Sederberg e Sederberg (2010).

Sederberg e Sederberg (2010) utilizaram cascos navais como exemplos geométricos para demonstrar que ao utilizar NURBS para representar essas geometrias, era necessária uma maior quantidade de pontos de controle quando comparado com a utilização de *T-splines* para representar o mesmo objeto. A figura 50B apresenta um casco modelado por NURBS com 72 pontos de controle; os pontos em vermelho são supérfluos (existem apenas para satisfazer restrições topológicas). A figura 50C, por sua vez, demonstra o mesmo casco representado por *T-splines* com 42 pontos de controle, e os pontos em azul demonstram as junções 'T' (descontinuidade da malha).

Outro fator relevante apresentado pelos autores é que a utilização de NURBS em projetos da indústria naval pode dificultar desnecessariamente a continuidade da superfície (estudo da curvatura ou *fairing*). Adicionalmente, o excesso de pontos de controle necessário às NURBS pode complicar também o *form finding* do processo de projeto. Neste sentido, as *T-splines* eliminam as linhas de pontos de controle que são supérfluas, e que nas NURBS são inevitáveis.

A Autodesk era a empresa que fornecia *plug-ins* para trabalhar com *T-splines* dentro do Rhinoceros e Solidworks (tsElements), entretanto, em 7 de janeiro de 2017, a empresa parou de atualizar esta entidade para estes programas. A versão 2018 do SolidWorks já não funciona com *T-splines* (o software chama este tipo de modelagem de *sculpting*), entretanto existem relatos nos fóruns de discussão do programa que é possível utilizar a entidade com a versão de 2016. Com isso a Autodesk concentrou a utilização da *T-spline* no seu próprio software de modelagem de sólidos: o FUSION 360<sup>75</sup>.

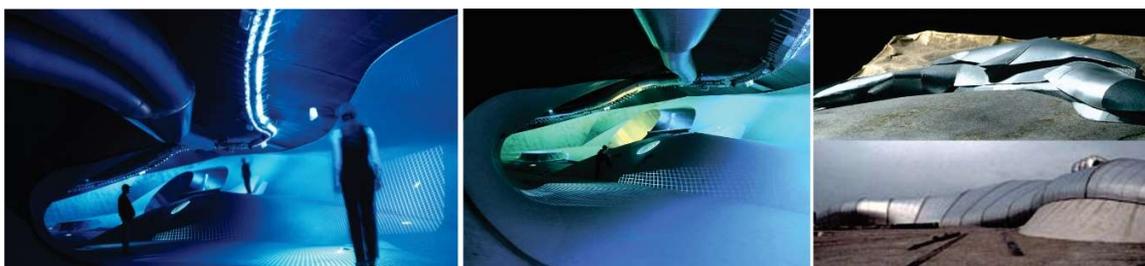
Um exemplo de arquitetura que também pode ser representada diretamente pela exploração topológica da superfície (como acontece com o uso de *T-splines*, ou *sculpting* no Fusion 360) é o caso do H2Oexpo (figura 51) ou pavilhão de água (1993 – 1997) do NOX *architects*. Nos textos sobre a edificação não há menção direta à entidade *T-spline* durante a fase de projeto, entretanto, qualquer obra arquitetônica que possua superfície com

---

<sup>75</sup> Através da entidade de modelagem *T-spline* é possível realizar transições geométricas, onde é possível iniciar a modelagem com *T-spline* e depois o Fusion pode converter para sólido a geometria resultante.

curvatura similar à cascos de barcos (com continuidade  $C^2$ ) são derivações de *splines* que podem ser relaxadas e suavizadas de acordo com o a malha de controle do polígono.

Figura 51: Pavilhão da água do Nox Architects



Fonte: Adaptado de Bordone, 2014

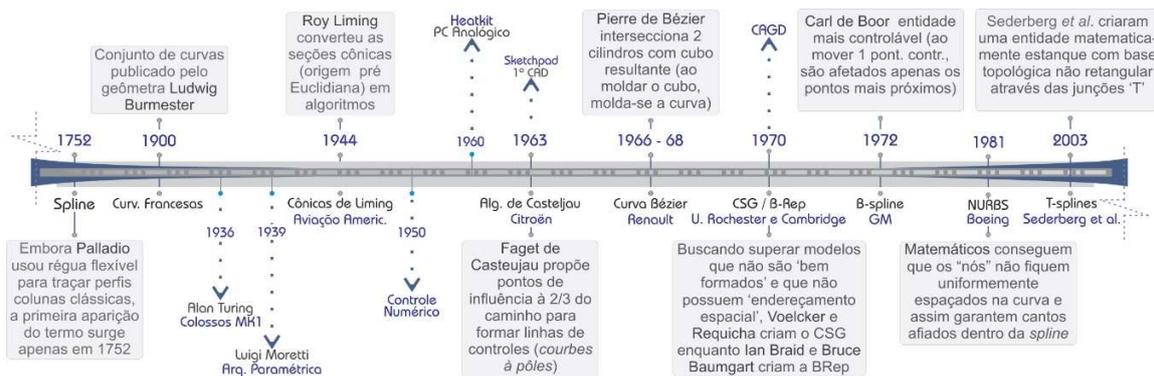
Ainda sobre o exposto, Bordone (2014) afirmou que o H2Oexpo se tornou pioneiro na indústria da construção, por ser o primeiro edifício que combinava superfície topológica projetada por *software* computacional e mídia interativa digitalmente projetada e controlada, descrição esta que se assemelha à uma caracterização de um projeto hipotético gerado por *T-splines*, uma vez que é possível ajustar a forma através da malha (de maior controle em virtude das junções em 'T') por meio de manuseio digital direto no local.

Por último, visando compreender melhor a trajetória histórica das entidades de modelagem em conjunto com os dados pertinentes ao desenvolvimento da área CAGD a pesquisa condensou as informações discutidas na linha do tempo da figura 52.

Ressalta-se que a posição das cônicas de Liming na linha do tempo da figura 52 aparece em 1944, entretanto, esta foi apenas a data em que Roy Liming transformou em algoritmos as seções cônicas que já existiam antes de Euclides. Outro fator relevante é o advento das entidades CSG e *B-Rep*, que foram posicionadas em 1970 (data de criação), e assim, parecem estar no meio da batalha entre as montadoras automobilísticas por controle projetivo; a pesquisa esclarece que optou por colocá-las nesta data por referência à criação das mesmas, entretanto, poderiam ser colocadas também após o advento da *B-*

*spline* (GM) e antes das NURBS (Boeing), visto que este é o período em que *softwares* que possibilitavam o uso de CSG e *B-Rep* começaram a ser comercializados.

Figura 52: linha do tempo das entidades de modelagem e correlatos



Fonte: Autor, 2019

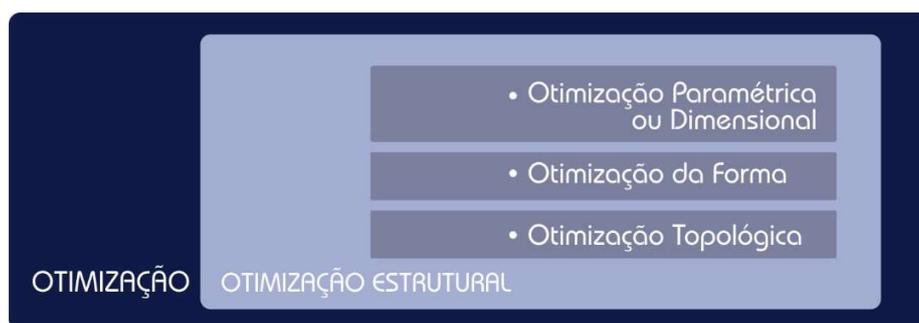
Sederberg et al. (2003) apresentaram outra entidade de modelagem chamada NURCCs (*Non-Uniform Rational Catmull-Clark Surfaces with T-junctions*) cuja tradução seria superfícies Catmull-Clark não uniformes com junções 'T'. De uma maneira simplificada, esta consiste no método de divisão da malha descoberto por Catmull e Clark que adiciona a facilidade das junções T à malha de controle. A presente pesquisa optou por não incluir esta entidade de modelagem na linha do tempo em virtude de não ter encontrado um software que trabalhe especificamente com a entidade e que esteja disponível aos profissionais de processo digital de projeto.

### 3.2 Otimização Topológica

Como a presente pesquisa utiliza processo digital de projeto de formação baseada em desempenho para estudar metodologicamente o problema proposto, torna-se necessário compreender o conceito de otimização topológica como ferramenta computacional para *form finding*.

Neste sentido, Coutinho (2006) afirma que entre as ferramentas digitais numéricas destacam-se os conceitos e métodos de minimização que viabilizam uma maneira sistematizada (FEM) na busca de soluções ótimas. Isto posto, a otimização estrutural é uma ferramenta digital de processo de projeto “que permite não apenas diminuir custos de fabricação, mas também diminuir custos de operação, ao melhorar a performance dos componentes e sistemas criados” (COUTINHO, 2006, p.15). Para Silva (2014), um problema de otimização é caracterizado por uma função objetivo (aquilo que se deseja otimizar) e suas restrições (limita o espaço de busca a um grupo de soluções que atenda determinadas necessidades)<sup>76</sup>. A figura 53 demonstra a ramificação dos tipos de otimização:

Figura 53: Ramificação dos tipos de otimização



Fonte: Adaptado de Silva, 2014

Coutinho (2006) afirma que as fases de análise e síntese do projeto sofreram uma mudança natural (em relação ao processo de projeto clássico) em virtude do rápido desenvolvimento dos métodos de otimização estrutural, capazes de determinar o campo de tensões e deformações para uma determinada carga através de análise que, neste caso, é entendido pela autora como um subproblema do processo de projeto que ajuda a avaliar o desempenho. A autora explica ainda que o método de otimização pode ser definido como:

<sup>76</sup> Para encontrar a solução do problema, a formulação matemática adequada que descreve o sistema é uma etapa fundamental, visto que aumenta-se a probabilidade de se encontrar uma boa solução quando são especificados corretamente os objetivos a serem otimizados e as restrições a serem cumpridas, conforme Silva (2014), que complementa ao dizer que as variáveis estudadas podem ser definidas por funções lineares ou não-lineares, podendo ou não possuir restrições.

[...] um processo de determinação do mínimo ou do máximo de alguma função, denominada função objetivo. A adequação de um projeto requer também a satisfação de um conjunto de requisitos especificados, os quais são chamados de restrições de projeto. Tanto a função objetivo, quanto as restrições de projeto podem ter características de análise ou de síntese do projeto (COUTINHO, 2006, p.15).

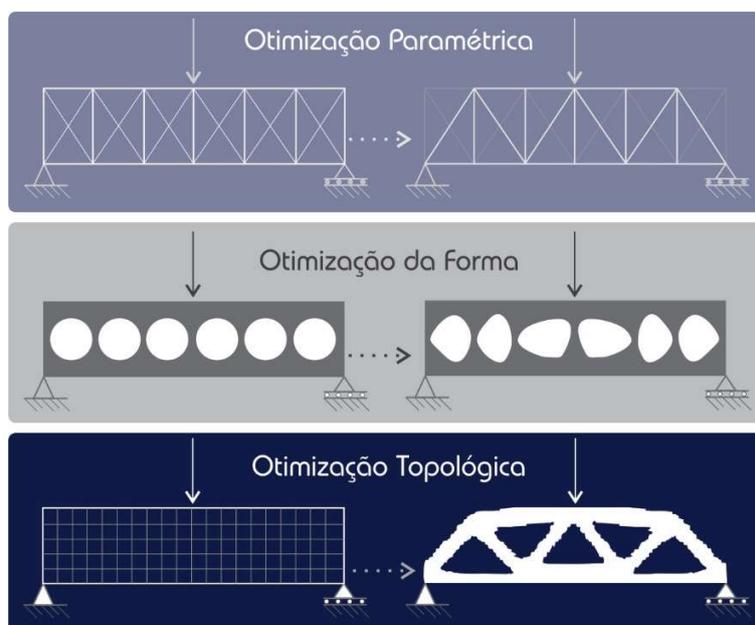
O desenvolvimento histórico do cálculo de otimização diferencial só foi possível, segundo Silva (2014), por conta das contribuições de Newton e Leibniz para a área. Ainda de acordo com a autora: Bernoulli, Euler, Weierstrass e Lagrange Cauchy lançaram as bases de cálculo das variações, sendo que este deu seu próprio nome para o método de otimização de problemas com restrições (que envolve a adição de multiplicadores desconhecidos). Mesmo com as contribuições supracitadas, houve pouco progresso nesta área até meados do século XX, fato que mudou posteriormente, vez que “quando os computadores de alta velocidade surgiram, estes possibilitaram a execução de procedimentos de otimização e simulação” (SILVA, 2014, p. 26), além de possibilitar mais investigações sobre novos métodos.

Isto posto, os métodos de otimização estrutural foram popularizados por Schmit (1960), que postulou a junção da programação matemática não-linear com a análise de elementos finitos o que possibilitou a criação de projetos otimizados e automatizados para os sistemas estruturais.

Coutinho (2006) complementa o exposto ao dizer que os problemas de otimização estrutural podem ser classificados como: otimização paramétrica ou dimensional, otimização da forma e otimização topológica (figura 53), sendo que para a autora as categorias diferenciam-se de acordo com o grau de complexidade. Neste sentido, na otimização dimensional as variáveis de projeto são elementos que constituem a estrutura e as propriedades de rigidez dos elementos (espessura das placas, área da seção transversal das barras, momento de inércia ou propriedade do material). Neste processo busca-se encontrar a melhor área de seção transversal dos elementos visando maximizar a rigidez com o mínimo de volume de material possível, por exemplo, conforme Silva (2014).

Nos casos de otimização da forma (figura 54) acontece a determinação do domínio ótimo de uma estrutura por meio da variação da forma do contorno. As variáveis neste caso, são parâmetros do domínio ocupado pela estrutura (comprimento de uma viga, posição da ligação dos elementos numa estrutura reticulada etc), conforme Silva (2014). Coutinho (2006) complementa o exposto ao dizer que na otimização da forma exige-se uma maior sofisticação na implementação numérica quando comparada à otimização dimensional, pois aquela necessita de uma malha automatizada e derivadas, geradas por técnicas sofisticadas para determinar a sensibilidade.

Figura 54: formas clássicas de otimização estrutural



Fonte: Adaptado de Bendsoe e Sigmund, 2003

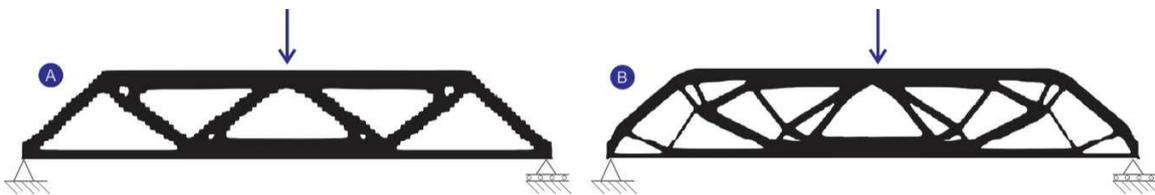
Por último, o objetivo da otimização topológica (figura 54), segundo Silva (2014), é procurar a distribuição ótima de material que minimize a flexibilidade da estrutura, através da manipulação da topologia estrutural dentro de um domínio admissível. Coutinho (2006) complementa o exposto ao dizer que esta ferramenta digital busca atender as restrições de escopo e minimizar a função objetivo do projeto, de modo que dentro de um espaço

predefinido e, sob condição específica de contorno, seja distribuído o material constituinte. Esta distribuição do material ocorre em virtude da modificação de algum comportamento mecânico da estrutura, como: tensão, flexibilidade, frequências naturais etc.

Silva (2014) ao avaliar os três tipos de otimização estrutural concluiu que a otimização topológica “permite obter diferentes tipos de orifícios na estrutura, possibilitando a distribuição do material (garantindo a minimização do mesmo) sem alterar o desempenho. De modo geral, Bendsoe (1995) afirma que a otimização do material (distribuição ótima) se constitui na verificação de quais pontos de domínio desta peça hipotética conterão material isotrópico (cujas propriedades físicas são constantes em qualquer que seja a direção analisada) e quais pontos estarão vazios, tornando, assim, o problema binário do tipo 0 ou 1.

Sobre as dificuldades que podem ocorrer nos métodos de otimização, Coutinho (2006) resalta a instabilidade numérica, que pode ocorrer por conta de um dos três fatores: dependência da malha, instabilidade do tabuleiro e mínimos locais. Neste sentido, uma malha com menor refinamento pode implicar em uma solução que “não consiga enxergar” alguns caminhos, em virtude justamente da falta de precisão imposta pela malha, conforme figura 55. Em síntese, “quanto mais refinada a malha de elementos finitos, maior será a nitidez da topologia ótima da estrutura”, conforme Coutinho (2006, p. 20).

Figura 55: Exemplos de topologias com malhas diferentes e mesmo domínio



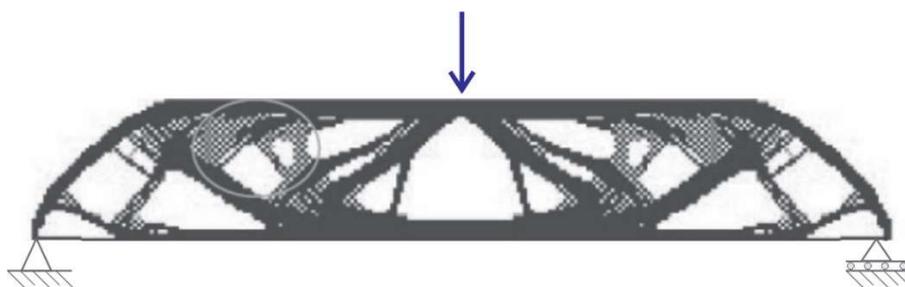
Fonte: Adaptado de Stump, 2006

A figura 55 mostra que através de uma malha com maior refinamento, obtém-se um aumento na quantidade de reforço na estrutura (a simulação consegue ‘enxergar’ novos

caminhos). Neste sentido, a figura 55A apresenta a resposta para um domínio hipotético em uma malha de 120 x 20 elementos, ao passo que a figura 55B apresenta o mesmo domínio, entretanto para uma malha com 240 x 40 elementos.

A instabilidade no tabuleiro (figura 56), também conhecido como *checkboard*, ocorre quando existe alternância entre cheios e vazios na distribuição de material como se fosse a imagem de um tabuleiro de xadrez, por conta desta alternância descontínua, a resposta não pode ser considerada ótima, conforme Coutinho (2006), que finaliza explicando que os problemas de mínimos locais acontecem em geometrias não convexas visto que nestes casos os algoritmos utilizados na programação convergem as respostas para pontos estacionários, que não necessariamente são mínimos globais, mas são locais.

Figura 56: Instabilidade do tabuleiro



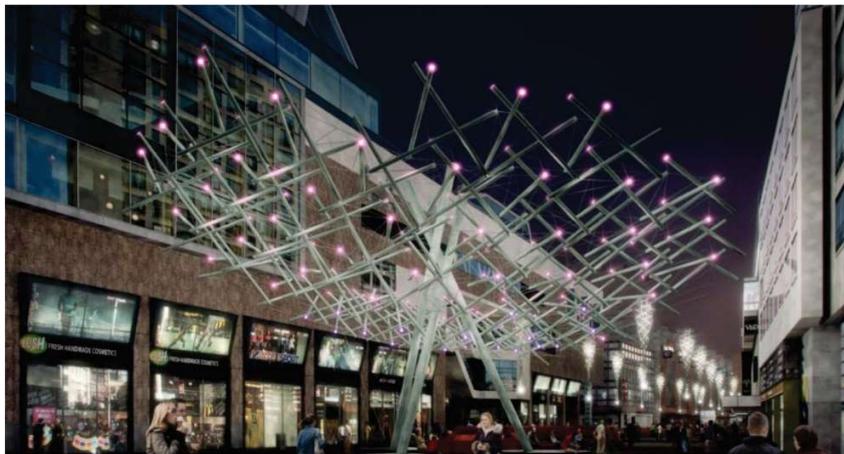
Fonte: Adaptado de Stump, 2006

Um significativo exemplo de processo digital de projeto que envolveu otimização topológica cuja fabricação pode ser considerada também uma referência entre a terceira e quarta revolução industrial (discussão no próximo capítulo) é a junta estrutural produzida por impressão 3D, que teve a peça para nós estruturais desenvolvida, em 2014, por meio de otimização topológica, pela Arup (empresa independente de designers, planejadores, engenheiros e especialistas técnicos que trabalha em todos os aspectos do ambiente construído).

De acordo com Galjaard et al. (2015) o projeto foi baseado num redesenho de uma peça já existente de uma estrutura de *tensigrity* (estrutura que possui elementos isolados

em compressão dentro de uma rede de cabos em tensão contínua) para um *shopping* de rua, em *The Hague*, na Holanda (figura 57). Como as estruturas integravam a iluminação viária, foram chamadas de candelabros urbanos ou *urban chandeliers*. Os autores afirmaram que a forma irregular das estruturas gerava a necessidade de produção de peças diferentes para os mais de 1600 nós que deveriam conectar os cabos.

Figura 57: Estrutura *tensigrity* original em The Hague



Fonte: Galjaard et al. (2015)

A primeira solução para o problema foi a construção de um tubo central com seis ou sete chapas soldadas para atender os ângulos de entrada das partes tensionadas da estrutura. Dessa forma, visando a produção mais rápida e inteligente destes elementos, a empresa propôs a fabricação de nós estruturais de ligas metálicas, de modo que atendessem formas complexas. A fabricação foi baseada no princípio de Sinterização Direta de Metal por Laser (DMLS)<sup>77</sup>. Note-se que neste projeto a concepção inicial era de aço

---

<sup>77</sup> Técnica de manufatura aditiva (camada por camada) que utiliza a energia concentrada do laser para fabricação, que pode diminuir o peso da peça entre 30 e 40% (sem alterar a resistência estrutural), além de reduzir em 40% as emissões de CO<sub>2</sub> (NABONI; PAOLETTI, 2015). Neste projeto específico o metal particulado foi derretido por lasers *layer por layer* (20 – 100  $\mu\text{m}$ ) para então fundir-se em uma massa homogênea conforme Galjaard et al. (2015).

inoxidável e as interações projetuais posteriores foram impressas em aço *Maraging*<sup>78</sup> (figura 58).

Na figura 58A é possível ver as duas peças produzidas após as otimizações topológicas além da peça original soldada, onde, de acordo com Galjaard et al. (2015), a primeira interação foi capaz de gerar uma peça 30% mais leve e a última, gerou uma redução de 75% no peso do nó estrutural com a metade da altura.

Figura 58: Otimização topológica de junta estrutural produzida pela Arup



Fonte: Galjaard et al. (2015)

Quando analisado como um todo, os autores afirmam que é possível conferir ao *tensigrity* uma redução total de mais de 40% no peso da estrutura em função das otimizações realizadas. Ressalta-se que em virtude da diminuição da altura dos nós, houve um aumento pouco significativo na deflexão da estrutura. Mesmo assim, todas as peças foram capazes suportar as cargas de projeto, uma vez que a análise das tensões de Von Mises (figura 58B) eram menores do que a tensão de escoamento (com exceção dos valores pontuais nas junções entre peça/barras tensionadas). Por fim, Galjaard et al. (2015) afirmaram que estas exceções locais eram aceitáveis (em virtude do comportamento plástico do aço). A peça final conectada às barras tensionadas é apresentada na figura 59.

<sup>78</sup> Tipo de liga metálica de alta resistência e baixo teor de carbono, uma vez que as reações do mesmo se relacionam com a precipitação de compostos intermetálicos e não com as reações do carbono em si, conforme Naboni e Paoletti (2015).

Figura 59: Peça estrutural já com as conexões instaladas



Fonte: Galjaard et al. (2015)

Ainda no que tange as ferramentas digitais que podem auxiliar os processos de projeto, Young (2011) afirmou que nos *softwares* de modelagem existem aspectos ligados com maior afinco às mediações geométricas das indústrias automotiva, aeroespacial e naval do que à arquitetura (como demonstrou este capítulo). Isto porque, nestas indústrias a continuidade da forma é um fator de relevância, visto que conforme Issa (2013), nestes setores, muitos modelos não podem ser construídos a partir de um remendo de superfície.

A continuidade entre os remendos é importante para a suavidade visual, a reflexão da luz e o fluxo de ar, características imprescindíveis para quem utiliza a aerodinâmica como condicionante projetual. É possível que a arquitetura não trabalhe a devida relevância à esta condicionante em virtude do baixo controle do meio de produção além da falta de mão de obra especializada, dificuldades estas que podem ser suavizadas ou até solucionadas a depender processo de fabricação adotado pela indústria, como abordaremos no próximo capítulo.

*Fabrication is not a modelling technique, but a revolution in the making of architecture.*

*Rivka e Robert Oxman*

## Capítulo 4 - Fabricação e Arquitetura

No capítulo anterior foi possível compreender o que Pontes, Alves e Cardoso (2012) defendiam quando afirmaram que “os progressos matemáticos, ao contribuírem decisivamente para o desenvolvimento de programas para cálculo computacional, têm permitido a concretização de formas complexas” (PONTES; ALVES; CARDOSO, 2012, p. 58). Isto porque as ferramentas digitais, em especial as entidades de modelagem, conseguem traduzir para o computador a matemática subjacente à forma, e posteriormente servir de base para a fabricação digital<sup>79</sup>.

Deste modo, uma vez que estes novos processos de projeto digitalmente mediados permitem que geometrias não convencionais possam fazer parte da indústria AECO, o presente capítulo discute os temas relevantes à fabricação arquitetônica, passando pelas eras tecnológicas descritas por Carpo (2011) como manual, mecânica e digital, e relacionando-as às quatro revoluções da indústria. Esta divisão temporal dos processos industriais de produção, que a pesquisa apresenta (figura 60), torna didático o estudo da temática e é baseada no trabalho de Schwab (2016), Celani e Frajndlich (2016), Miyasaka (2017) e Sacomano e Sátyro (2018).

---

<sup>79</sup> A fabricação digital utiliza sistemas de manufatura aditiva (também conhecida como prototipagem rápida) ou manufatura restritiva (conhecida também como usinagem CNC). Isto posto, a fabricação digital vem ganhando reconhecimento como uma tecnologia de grande importância para o processo de projeto, visto que é capaz de produzir rapidamente um protótipo para trabalhar a compreensão espacial de um dado projeto (BRUCATO *et al.*, 2014).

Figura 60: Processos industriais de produção



Fonte: Adaptado de Miyasaka, 2017 e Sacomano e Sátyro, 2018

O capítulo apresenta ainda um diagrama com o panorama da área de fabricação ligada à arquitetura e às revoluções industriais, com o intuito de elencar em qual das ramificações se encontram as investigações da presente pesquisa.

#### 4.1 A primeira revolução industrial

Schwab (2016) explica que o termo "revolução" deve denotar uma mudança abrupta e radical, pois as revoluções, para o autor, ocorreram quando houveram profundas mudanças na estrutura social e nos sistemas econômicos; aspectos estes que foram desencadeados pelas novas tecnologias e novos modos de perceber o mundo. Levando em consideração que neste tipo de análise a história é utilizada como referência, as 'mudanças abruptas' às quais o autor se refere, podem levar anos para se concretizarem.

Ainda nesta linha de raciocínio, Schwab (2016) afirmou que a primeira profunda mudança no modo de vida humano ocorreu com a revolução agrária (há cerca de 10 mil anos, através da domesticação dos animais que auxiliaram na produtividade e transporte), e que este acontecimento catalisou, segundo o autor, a produção de alimentos e o crescimento populacional, o que levou à ascensão das cidades e à urbanização.

Esta revolução agrária foi seguida por uma série de revoluções industriais que começaram na segunda metade do século XVIII (entre 1760 e 1840), conforme Schwab (2016). Naboni e Paoletti (2015) complementam o exposto ao dizer que a primeira

revolução industrial teve início com a mecanização da indústria têxtil<sup>80</sup> na Grã-Bretanha (uma das ilhas Britânicas na Europa).

Schwab (2016) afirma que esta revolução foi impulsionada pela invenção da máquina à vapor cuja energia gerada foi, para Miyasaka (2017), um dos marcos deste período da indústria, junto com o tear mecânico e a distribuição de produtos através das estradas de ferro. Corroborando este raciocínio, Carpo (2011) afirma que foram estes os acontecimentos que marcaram a transição da era tecnológica manual para a mecânica.

Miyasaka (2017) apresentou os termos que considerava serem palavras de ordem da 1ª revolução industrial: tempos e movimentos, padrão, média, mecanização, longas jornadas, insalubridade em todos os níveis, divisão do trabalho, mínima customização dos produtos, entre outros. Foi nesta época, segundo Tönnies (2002), que as peças de ferro fundido (produzidas industrialmente) tornaram-se um material de construção comum para a engenharia, o que permitiu a exploração de vão maiores. Entretanto, o autor ressalta que a utilização destes novos materiais ainda buscava imitar<sup>81</sup> a forma e o modo de uso dos materiais até então utilizados.

Para Celani e Frajndlich (2016) um novo conjunto de necessidades surgiram deste contexto, uma vez que o desenho urbano se tornou mais preocupado com transporte e

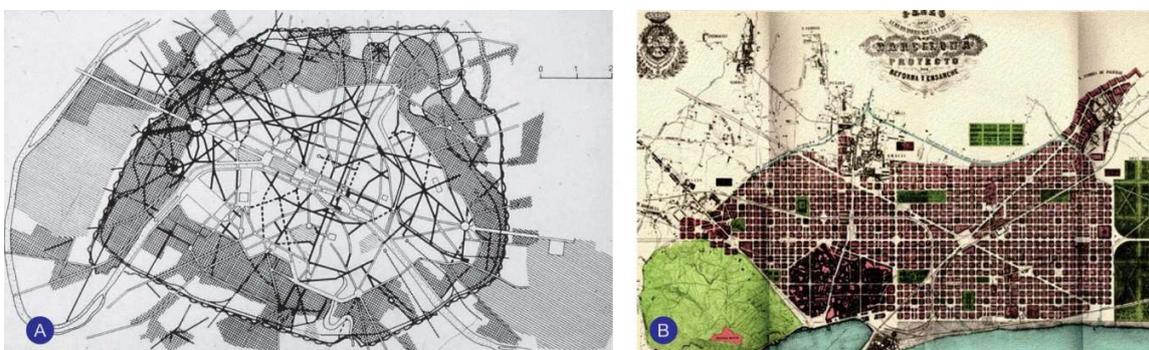
---

<sup>80</sup> Nesta época, de acordo com Naboni e Paoletti (2015), centenas de casas de tecelagem poderiam ser substituídas por uma única fábrica de algodão, que era baseada no conceito de mecanização, e de fábricas industriais centralizadas e capitalistas; sendo assim que se iniciou uma nova era produtiva. De acordo com Sacomano e Sátyro (2018), com a criação do tear mecânico, as empresas familiares (proprietárias de rocas de tear) tornaram-se não competitivas e passaram a trabalhar para os donos dos meios de produção, chamados de capitalistas pelos autores. Este fato foi, para os autores, o que marcou o surgimento da classe operária que também empregava crianças e adolescentes, ganhando baixos salários, e cuja jornada de trabalho podia chegar a 16 horas diárias.

<sup>81</sup> Larena (2007) afirma que de início, quando surgia um novo material que seria utilizado pela indústria AECO, “as formas e tipologias estruturais adotadas, reproduziam os sistemas estruturais precedentes e as características dos materiais até então existentes, sem aproveitar nem expressar as possibilidades que o novo material podia oferecer” (LARENA, 2007, p. 9). O autor afirma que esta pode ser entendida como uma fase inicial de experimentação e descobrimento do material. Em outras palavras, historicamente toda vez que a engenharia empregava um novo material com grande potencial (que ainda não conhecia totalmente), ela buscava utiliza-lo da mesma maneira que era utilizado os materiais predecessores. Um dos casos citados pelo autor é a primeira ponte metálica da história, conhecida como ponte de Coalbrookdale, que possui forma de arco em virtude da herança das pontes de pedra e cujos detalhes construtivos recordam as pontes de madeira (LARENA, 2007).

infraestrutura; estes novos aspectos deveriam abarcar a movimentação de pessoas e mercadorias por trens, bondes e teleféricos (possíveis pela própria fabricação mecânica industrial). Os autores apresentaram a intervenção ao plano urbanístico de Paris (figura 61A), de Georges-Eugène Haussmann (1853-1871), e o traçado urbano de Barcelona (figura 61B), de Ildefons Cerdà (1860), como exemplos da aplicação das utopias urbanas desta época.

Figura 61: Planos urbanísticos de Paris (A) e Barcelona (B)



Fonte: Adaptado de Benevolo, 1997 e Carneiro, 2007

## 4.2 A segunda revolução industrial

Sacomano e Sátyro (2018) afirmaram que a cidade de Cincinnati, em Ohio, se transformou, entre 1825 e 1870, no maior centro de manufatura comercial do Oeste dos Estados Unidos. Foi este o período em que as empresas da cidade<sup>82</sup> adotaram a divisão e a especialização do trabalho, para se tornarem especialistas na produção de determinados produtos, o que acabou por gerar a produção em massa e deu a Cincinnati o título de uma das maiores produtoras de carne e seus subprodutos, conforme apontou Gordon (1990).

---

<sup>82</sup> Sacomano e Sátyro (2018, p. 20) afirmaram que as empresas da cidade de Cincinnati adotaram a divisão e a especialização do trabalho, e conseqüentemente a produção em massa por terem sido inspiradas, neste período histórico (entre 1825 e 1870) “no livro de Adam Smith, A riqueza das nações, publicado em 1776 [...]”

A racionalização e o aperfeiçoamento da divisão do trabalho em etapas múltiplas foram desenvolvidos por Frederick Taylor, o que para Ferreira, Reis e Pereira (2011), marcou o início da segunda revolução industrial. Foi este o contexto, que levou vários empresários a visitarem Cincinnati, com o intuito de conhecer a manufatura em massa e, conseqüentemente, o novo processo de produção.

Para Sacomano e Sátyro (2018, p. 20), “Henry Ford teve então a ideia de adaptar para a manufatura artesanal de produção de carros essa nova manufatura em massa”, que, em conjunto com o advento da eletricidade, tornou-se fator de fomento à segunda revolução da indústria, entre o final do século XIX e início do século XX, conforme Schwab (2016).

À revelia de como se deu a primeira revolução industrial, que mecanizou o trabalho manual, a segunda, substituiu a construção estacionária pelas linhas de montagem (FISCHER, 2015). Para explicar esta transição e relacioná-la à arquitetura, Hildebrand (1975) apresentou Albert Kahn como o arquiteto cujo trabalho marcou a segunda revolução industrial. O autor defendeu esta afirmação ao apresentar uma série de edificações deste setor, concebidas por Kahn, que permeiam a história da linha contínua de montagem e da produção industrial em massa.

Ainda neste tocante, Albert Kahn, que havia sido nomeado arquiteto da *Packard Motor Car Company*, concebeu, em 1905, o edifício Packard nº 10. Esta obra ficou estigmatizada como sendo a primeira fábrica de concreto armado construída para a indústria automobilística, além de marcar também o início do trabalho de Kahn na área industrial (HILDEBRAND, 1975).

Em 1906, o autor afirma, a empresa de George N. Pierce (*Pierce-Arrow Motor Car Company*) nomeou Kahn para o projeto da nova fábrica (figura 62B), em Buffalo, que iria produzir o carro *Pierce Arrow* (1). Esta edificação inaugurou, segundo Hildebrand (1975), os conceitos de projeto de fábrica progressiva, pois não foram as limitações arquitetônicas,

mas sim os processos de fabricação, que definiram a planta baixa<sup>83</sup>. A planta era de predominância horizontal (figura 62A), e a matéria prima entrava no que era conhecido como edifício de brasagem (armazém ao norte da planta), para depois, através da face leste, alimentar o edifício de fabricação, e, por fim, após o processo de montagem, conseguia-se um automóvel completo que saia pela fachada oeste.

Figura 62: Planta baixa e perspectiva da fábrica Pierce



Fonte: Adaptado de Hildebrand, 1975

Após a construção da fábrica Pierce, Hildebrand (1975) relata que Kahn conheceu Henry Ford em 1908, e que este o convidou para o projeto de sua nova fábrica em Highland Park (figura 63A). Foi assim que, em 1910, este novo edifício já começava sua produção do Modelo T da empresa. Segundo o autor, a configuração desta fábrica derivava das experimentações em métodos de produção do próprio Ford que utilizava calhas de gravidade para auxiliar e aumentar a produção de suas fábricas já existentes.

---

<sup>83</sup> A lógica de organização em torno do processo de montagem da fábrica foi possível em virtude da proposta de Kahn de iluminação pelo telhado, uma vez que os edifícios deste segmento costumavam possuir a restrição arquitetônica de serem longos e estreitos para que pudessem iluminar todo o chão de fábrica através da penetração de luz das janelas das paredes (HILDEBRAND, 1975).

Figura 63: Fábrica da Ford de Highland Park projetada por Albert Kahn



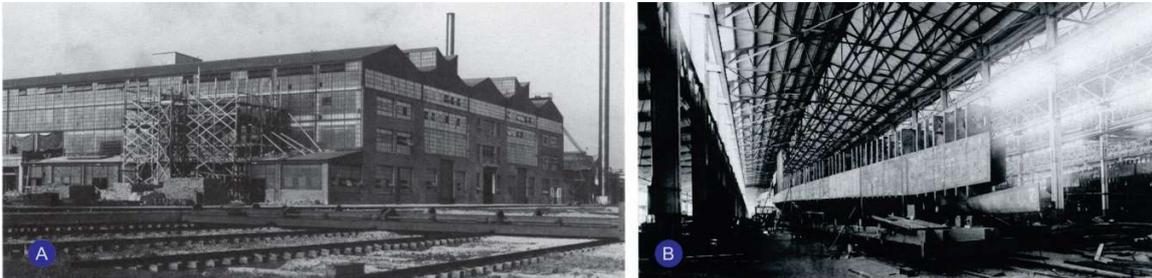
Fonte: Adaptado de Hildebrand, 1975

Kahn utilizou como premissa de projeto para a fábrica em Highland Park a máxima exploração destas calhas de gravidade, o que resultou em uma estrutura de múltiplos andares (figura 63B), como apontou Hildebrand (1975). Deste modo, o processo de fabricação do carro terminava no nível do solo e começava com o içamento das matérias-primas para o telhado que iam “escorrendo” pelos níveis do edifício.

Em março de 1913, a Ford experimentou em Highland Park um procedimento de montagem de uma peça, que era dividido em 29 etapas sucessivas; com o treinamento adequado dos trabalhadores, a Ford conseguiu reduzir em 75% o tempo inicial de montagem desta peça (de 20 para 5 minutos), conforme relatou Hildebrand (1975). O autor complementou que o sucesso deste procedimento levou-o a ser adotado para a montagem do carro inteiro, Kahn então percebeu que a configuração de múltiplos andares adotada no projeto da fábrica Pierce, seria inapropriado para as novas técnicas que seriam utilizadas no edifício Highland Park.

Visando solucionar esta problemática, Henry Ford comprou em 1915 uma extensa área em Detroit para a construção de um complexo industrial (figura 64A e B) voltado para a produção da sua linha de montagem (*River Rouge Complex*). Dessa forma, em 1917, Kahn projetou uma fábrica para este local, agora com pouco mais de 500 metros de extensão, onde a iluminação principal era feita pelo telhado. Este projeto ficou conhecido como o primeiro edifício especificamente projetado para processos de fabricação de linha de montagem (HILDEBRAND 1975).

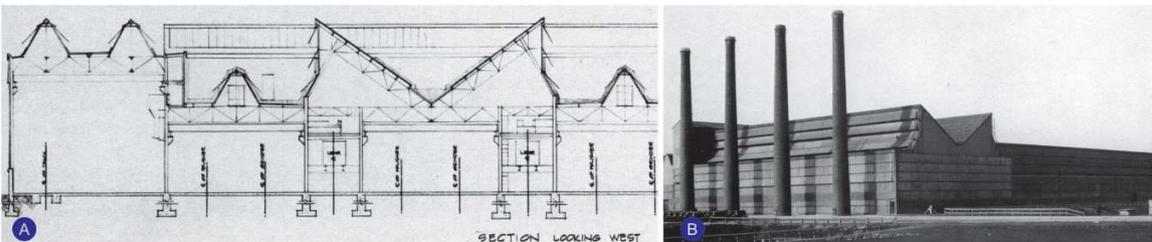
Figura 64: Complexo River Rouge da Ford



Fonte: Adaptado de Hildebrand, 1975

Hildebrand (1975) afirmou que, com o passar dos anos, o complexo River Rouge acabou por possuir, quase que exclusivamente, edifícios de um único pavimento que eram iluminados pelo telhado, além de serem organizados de acordo com a lógica do processo de fabricação. Por último, o autor apresentou a fábrica de vidro (figura 65B), de 1922, como exemplo da alta qualidade dos projetos existentes no complexo Rouge.

Figura 65: Fábrica de vidro presente no complexo River Rouge da Ford



Fonte: Adaptado de Hildebrand, 1975

Hildebrand (1975), que considera a fábrica de vidro da Ford como uma das principais edificações do século XX, afirmou que a mesma trabalhava em um ambiente de calor intenso<sup>84</sup>, e por isso o telhado possuía grandes extensões de faixas de ventilação (figura

<sup>84</sup> Os fornos eram aquecidos até 2500° para que a areia entrasse no estado líquido, para depois ser transportada, recozida e solidificada novamente e, por último, planificada por um rolo compressor e polida para adquirir a transparência dos vidros. A luz chegava às áreas de carga através da faixa de rolamento do vidro em estado líquido e das claraboias contínuas menores (HILDEBRAND, 1975).

65A), sendo que as partes mais altas do mesmo ficavam acima da esteira em que o vidro líquido passava, para permitir que o calor do recozimento escapasse pela faixa de ventilação.

Não obstante, o trabalho repetitivo, a forte supervisão e a hierarquia similar à militar fizeram a rotatividade da força de trabalho chegar a mais de 50% nas fábricas Ford. Isso contribuiu para o surgimento de novas formas de administração da produção e motivou filmes críticos à manufatura em massa, como *Tempos Modernos*, de Charles Chaplin, que mostra a pressão a que os funcionários eram submetidos nas linhas de produção. A manufatura em massa [...] trouxe a padronização de produtos, com a inflexibilidade de produzir o que não fosse massificado e, a verticalização das empresas, que procuram dominar todo o ciclo de produção, da matéria-prima, à venda dos produtos (SACOMANO, SÁTYRO, 2018, p. 20).

Mesmo considerando o pensamento de Hildebrand (1975), que defende o trabalho de Albert Kahn como um marco na história da segunda revolução industrial, é preciso igualmente ressaltar as experiências das casas que foram concebidas para dialogar com essa nova metodologia industrial. Neste sentido, Celani e Frajndlich (2016) afirmaram que a arquitetura buscou integrar as utopias urbanas com o design de componentes produzidos em massa, o que resultou em um conceito que possuía nome similar: casas produzidas em massa.

Deste modo, o que era uma utopia (casas pré-fabricadas) tornou-se uma realidade após a Segunda Guerra Mundial. Àquele momento, visando a reconstrução da Europa, elementos de concreto pré-fabricados tornaram-se comuns na indústria AECO (CELANI; FRAINDLICH, 2016). Ainda neste tocante, os autores apresentaram como exemplo destas arquiteturas as investigações pré-fabricadas do *Neue bauen*, de 1925-1930, de Ernst May, em Frankfurt, e a *Maison Dom-ino*, de Le Corbusier, de 1914 (figuras 66A, B e C).

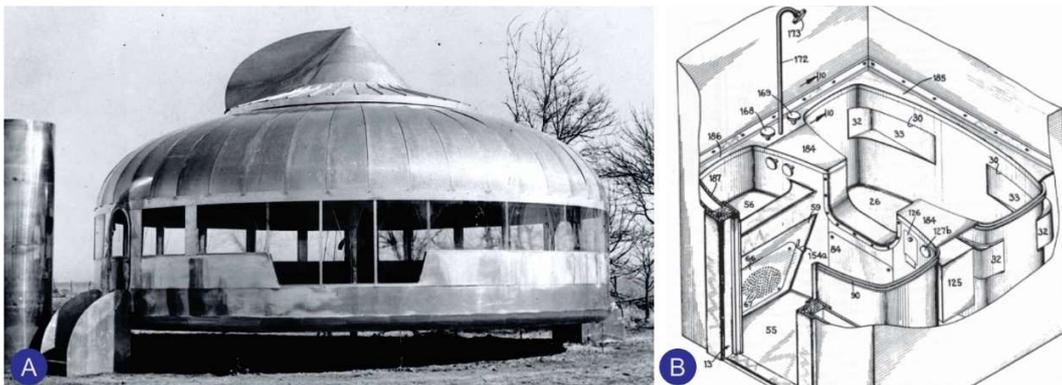
Figura 66: Sistema e casas *Maison Dom-ino* de Le Corbusier



Fonte: Adaptado de Palermo, 2006

Miyasaka (2017) concorda com o exemplo (*Maison Dom-ino*) proposto por Celani e Frajndlich (2016) e associa também os trabalhos de Buckminster Fuller (casa Dymaxion, figura 67A e B), Konrad Wachsmann (módulos) e John Habraken (Sistemas Abertos) à produção em massa ligada à arquitetura.

Figura 67: Casa Dymaxion Buckminster Fuller



Fonte: Adaptado de Facralossi, 2013

Naboni e Paoletti (2015) afirmaram que a primeira e a segunda revolução industrial trouxeram como benefícios: preços mais baixos e produtos de maior qualidade, entretanto,

como consequência, foi possível observar a aplicação da padronização e homogeneização em todas as coisas e lugares, fruto de um mercado dominado pela própria produção em massa.

No que diz respeito ao urbanismo, Celani e Frajndlich (2016) explicam que nas primeiras décadas do século XX, as cidades eram concebidas para os novos carros que também eram produzidos em massa. Esta diretriz urbanística pode ser notada nas diversas expansões possíveis no conceito de desenvolvimento urbano de *Boadacre*, de Frank Lloyd Wright, de 1932, e no tecido urbano contínuo da *Ville Radieuse*, de Le Corbusier, de 1924.

### **4.3 A terceira revolução industrial**

Para contextualizar a terceira revolução da indústria, Sacomano e Sátyro (2018) alegaram que o Japão havia sido devastado e possuía poucos recursos no fim da Segunda Guerra Mundial, e, em virtude disso, o governo lançou um pacote que incentivava o país a reduzir desperdícios. Desta feita, a Toyota, frente a impossibilidade de copiar o sistema de produção em massa da Ford, criou o sistema Toyota de produção.

Taiichi Ohno e Eiji Toyota foram os engenheiros responsáveis pela criação do sistema cuja as bases eram: a redução do desperdício ao mínimo, não produção do que não agregasse valor ao produto, eliminação de perdas, preocupação constante com a qualidade desde o projeto do produto, produção enxuta, bom desempenho do processo de manufatura, produção pautada pela demanda dos clientes (conhecida como produção puxada), redução dos estoques, padronização, automação<sup>85</sup>, redução do ciclo de desenvolvimento de produtos e parceria entre fornecedor e produtor (SACOMANO; SÁTYRO, 2018).

Schwab (2016) apontou os anos 60 como o momento em que começou a terceira revolução industrial, revolução esta, também chamada de digital, ou dos computadores,

---

<sup>85</sup> Silveira e Lima (2003) explicaram que o termo automação é utilizado na atualidade para designar um conjunto de técnicas que visam tornam automáticas um determinado número de tarefas, substituindo assim a força humana de trabalho por dispositivos computacionais.

por ter sido catalisada “pelo desenvolvimento de semicondutores, pela computação como estrutura principal (década de 1960), pela computação pessoal (décadas de 1970 e 1980) e pela internet (década de 1990) ” conforme Schwab (2016, p. 11).

Sacomano e Sátyro (2018), por sua vez, afirmaram que 1960 foi a época em que a automação industrial foi facilitada em virtude dos Controladores Lógicos Programáveis (CLP). Para os autores, “a eletrônica foi evoluindo com o tempo, tornando-se mais barata e com maior capacidade de atender a novos e maiores desafios e a Tecnologia da Informação (TI) passou a ser usada intensamente no apoio e controle da manufatura” (SACOMANO; SÁTYRO, 2018, p. 21).

Naboni e Paoletti (2015) afirmaram que este foi o período em que foram introduzidos os conceitos de gestão científica, consultores de gestão e automação. Miyasaka (2017) complementa o exposto ao dizer que a indústria associada à terceira revolução deste setor trabalhava com braços articulados que movimentavam o produto e auxiliavam a fabricação de equipamentos através das linhas de montagem.

Gershenfeld, Gershenfeld e Cutcher-Gershenfeld (2017), no livro *Designing reality*, entendem a terceira revolução industrial como uma série de revoluções digitais, tendo a primeira acontecido na comunicação (passagem do telefone análogo para a internet), e a segunda, na computação (computador pessoal e *smartphones*). A fabricação seria para os autores, a terceira revolução digital que complementaria as duas primeiras, visto que permitiria a manipulação exponencialmente maior dos bits (mundo virtual) e átomos (mundo físico) através da fabricação pessoal.

Nota-se que as três revoluções digitais propostas por Gershenfeld, Gershenfeld e Cutcher-Gershenfeld (2017) podem ser entendidas como subdivisões da terceira revolução industrial proposta por Schwab (2016) e defendida também por Naboni e Paoletti (2015), Celani e Frajndlich (2016), Miyasaka (2017), Sacomano e Sátyro (2018) entre outros. Ressalta-se, porém, que Gershenfeld, Gershenfeld e Cutcher-Gershenfeld (2017) fazem uma discussão pautada, especificamente, no que ficou conhecido como fabricação digital, e talvez por isso optem por fazer essas subdivisões.

A fabricação digital é baseada num movimento em constante expansão, conhecido como movimento *Maker* (faça você mesmo). Este movimento tem como objetivo utilizar mínimos recursos, e compartilhar o máximo possível as ideias e projetos em espaços próprios, possibilitados por uma rede de laboratórios de fabricação (*Makerspaces*, *Hackerspaces* ou Fab Labs). Nestes locais, os usuários podem utilizar equipamentos para produzir seus próprios protótipos e experimentar novos processos de projeto, além de adquirir novas oportunidades de aprendizado.

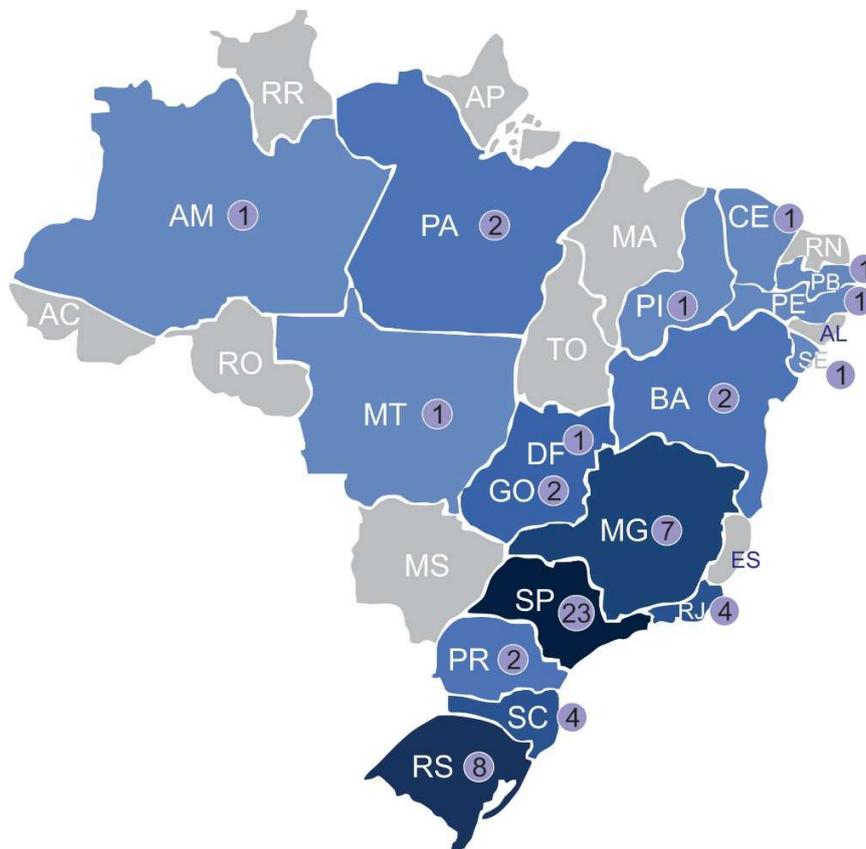
Foi justamente a percepção da expansão do movimento *Maker*, aliada ao intuito de mostrar que qualquer pessoa em qualquer lugar poderia criar qualquer coisa, que, em 2001, a *National Science Foundation* (NSF) criou, no MIT (EUA), um espaço onde pessoas de diversas áreas poderiam se reunir para executar projetos de fabricação digital de maneira colaborativa. Nascia o Fab Lab ou laboratório de fabricação, um espaço multidisciplinar capaz de possibilitar o acesso da comunidade às plataformas de prototipagem, visando o empreendedorismo local (PINTO et al., 2016).

O cerne de um Fab Lab é o acesso público, de maneira que a comunidade mundial trabalha de forma colaborativa para que não haja fronteiras internacionais e, desta maneira, algo produzido em uma metrópole pode ser produzido localmente também, em qualquer outro laboratório de fabricação digital do planeta. Para ser considerado como um Fab Lab em conformidade com a rede é preciso que sejam seguidos alguns conceitos básicos, conforme apontaram Pinto et al. (2016):

- Acesso gratuito para a comunidade pelo menos em tempo parcial (tecnologia acessível a todos é essencial);
- Possuir ferramentas e processos comuns aos Fab Labs (impressão 3D, fresagem CNC, circuito de produção, corte a laser/gravura, fresagem de precisão e vinil plotter);
- Envolver-se com a rede mundial de Fab Labs, (videoconferências, participação de encontros anuais, atuar na Fab Lab *Academy*, colaborar com a rede em cursos e palestras etc);

Para se ter uma ideia do crescimento desta área no ano de 2016 existiam 673 Fab Labs no mundo (PINTO et al., 2016), tendo passado para 1171 em 2017: um crescimento de aproximadamente 74%. No contexto nacional, o Brasil apresentava, em 2017, 40 laboratórios de fabricação digital vinculados ao *Fab Lab Foundation* (organização americana que auxilia a criação destas entidades no mundo), mas em dezembro de 2018 (época da checagem feita por esta pesquisa) haviam 62 Fab Labs espalhados pelos estados brasileiros (um crescimento de 55%). A distribuição quantitativa de laboratórios de fabricação vinculados à rede, presentes no Brasil, pode ser vista na figura 68.

Figura 68: Quantidade de Fab Labs distribuídos nos estados brasileiros em 2018.



Fonte: Autor, 2019

Ainda no tocante à terceira revolução da indústria e suas palavras de ordem, é preciso pontuar que mesmo considerando os apontamentos de Sacomano e Sátyro (2018) que apresentaram o sistema Toyota de produção como um importante fator para esta revolução industrial, ressalta-se que a padronização (defendida pelos autores supracitados como uma das bases do sistema) provavelmente faz referência ao momento histórico em que o Japão se encontrava (poucos recursos disponíveis). A importância deste apontamento surge em virtude da expressão (aparentemente contrária à palavra padronização já citada) que acabaria por se tornar um termo de ordem desta era tecnológica: a customização em massa, cuja expressão foi definida, em 1987, por Stan Davis no livro *'Future Perfect'*, conforme apontaram Naboni e Paoletti (2015) e Celani e Frajndlich (2016).

Para Naboni e Paoletti (2015), o livro de Davis forneceu uma estrutura conceitual para um processo que, seis anos depois Joseph Pine definiria como uma combinação entre ofício artesanal e elementos de produção em massa. A definição de Pine buscou associar os aspectos positivos da fabricação artesanal (manufatura) com as benesses da produção em massa, haja vista que até a segunda revolução industrial a personalização não era um aspecto normalmente trabalhado.

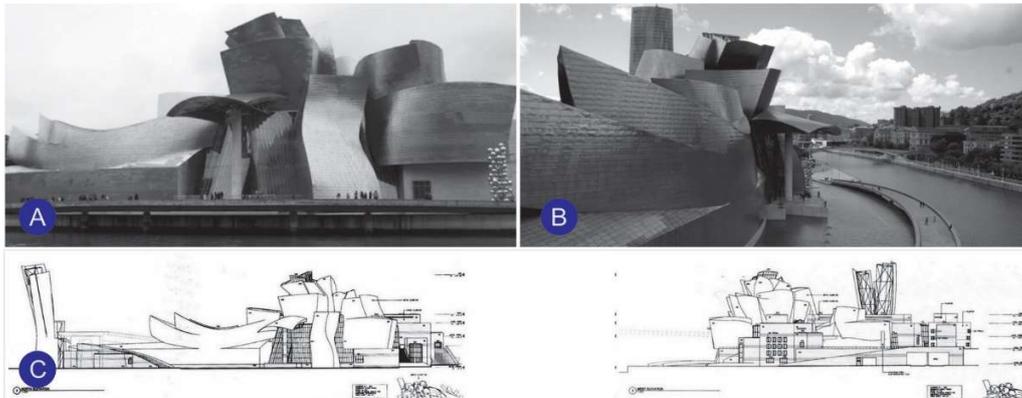
Miyasaka (2017, p. 98) complementa o raciocínio apresentado ao dizer que a terceira revolução industrial possuía “uma produção voltada para a customização em massa acionada a partir da venda programada” diretamente ligada à produção. Nilson (2007) relacionou a temática ora exposta com o processo de projeto algoritmo (assunto já abordado no capítulo 2) quando disse:

Nos processos de produção digital um único algoritmo pode gerar um número infinito de funções matemáticas que podem se traduzir em formas e superfícies, as quais dividem este mesmo algoritmo original invisível. Todo produto em um processo de produção digitalmente dirigido pode ser fabricado de maneira única, o que torna possível a produção em série de diversos tipos de produtos onde cada elemento de sua forma é diferente dos elementos dos outros produtos – ao contrário da produção mecânica onde a produção em série implica a repetição de elementos idênticos. Este tipo de produção digital é normalmente chamado de customização em massa ao invés de produção em massa – ou na

arquitetura ‘não convencional’ (*non-standard*) especialmente após a exposição de mesmo nome, em 2003, no Centro Pompidou de Paris (NILSSON, 2007, p. 5).

Neste sentido, ao relacionar a discussão esta revolução da indústria com um dos ícones da arquitetura mundial, Celani (2018, p. 18) relata que “o Guggenheim de Bilbao [...] marca a aplicação em larga escala, na arquitetura, de técnicas de produção ligadas à terceira revolução industrial”. De acordo com Pontes, Alves e Cardoso (2012, p. 58), a solução adotada para o Guggenheim, que foi inaugurado em 1997 (figuras 69A e B), “foi a construção e a justaposição de módulos parciais com estrutura regrada, para o que foi determinante a utilização de *software* especializado”. Pagnotta (2016) explica que o edifício foi construído em titânio, calcário e vidro, e que as curvas de Frank Gehry, que parecem ser aleatórias (figura 69C), na verdade foram desenhadas com o intuito de captar a luz.

Figura 69: Museu Guggenheim de Bilbao



Fonte: Adaptado de Pagnotta, 2016

Sobre a mediação digital do projeto, Pagnotta (2016) relatou que foi utilizado o *software* CATIA (a sigla vem de *Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application*, da *Dassault Systèmes*, mesma fabricante do *SolidWorks*) em virtude da complexidade da matemática subjacente à forma. O programa dimensionou a grelha triangular interna do

Guggenheim, além de calcular e locar cada uma das barras exigidas pela estrutura (todas as peças são exclusivas). Nas palavras do autor: “o *software* digitaliza pontos nas bordas, superfícies e interseções nas maquetes feitas à mão por Gehry para construir modelos digitais que podiam, então, ser manipulados na forma de animações 3D” (PAGNOTTA, 2016, p. 1).

Mesmo concordando com Celani (2018), que defende o museu supracitado como o edifício emblemático que marca as técnicas de produção associadas à terceira revolução industrial, é preciso pontuar que este não foi o primeiro experimento da Gehry Partners a associar arquitetura e customização digitalmente mediada. Naboni e Paoletti (2015) afirmaram que o escritório de Gehry foi também o primeiro a experimentar, no final da década de 1980, um processo de fabricação e de construção “sem papel”. Estas investigações resultaram no projeto de uma escultura gigante em forma de peixe, em 1992, na orla de Barcelona (figura 70D).

Figura 70: Escultura de peixe gigante da Gehry Partners



Fonte: Adaptado de Naboni e Paoletti, 2015

O processo inicial, conforme Naboni e Paoletti (2015), envolvia maquete física (figura 70C) que serviu de base para um modelo de superfície digital correspondente (figura 70B), que foi refinado para análise estrutural (figura 70A). Por fim, foi o modelo digital que direcionou a produção e a montagem dos componentes estruturais em escala.

No que tange as técnicas de produção industriais ligadas à terceira revolução do setor, Kolarevic (2003) afirmou que os empreiteiros entenderam que era possível reduzir possíveis erros devido à transferência de informação, além de economizar tempo na

indústria AECO, quando perceberam que, mesmo sem produzir desenhos, poderiam utilizar a informação digital nos processos de fabricação e construção para conduzir máquinas CNC.

Para empreiteiros de construção, que estavam acostumados à produção de geometrias ortogonais, projetos complexos pareciam desnecessariamente difíceis de construir. Diante desse problema, os arquitetos começaram a perceber a necessidade de dialogar diretamente com os fabricantes para ver sua arquitetura experimental se materializar (NABONI; PAOLETTI, 2015, p. 8).

A volta do envolvimento direto dos arquitetos com a produção de edifícios, ocorreu Segundo Kolarevic (2003), por conta da complexidade das formas não convencionais<sup>86</sup>, que trouxeram à tona a questão de como trabalhar a tectônica de superfícies contínuas e curvilíneas presentes na arquitetura contemporânea. Para o autor, a credibilidade das complexidades espaciais, introduzidas pela ‘nova vanguarda digital’, foi desafiada pela sua própria construtibilidade. Ou seja, para que as formas não convencionais pudessem ser exploradas e ao mesmo tempo edificadas, era preciso que fossem demonstradamente exequíveis.

Kolarevic (2003) complementa o exposto ao dizer que, em um contexto onde a construtibilidade estaria diretamente relacionada à computabilidade, o discurso da tectônica na arquitetura não se centraria mais na edificabilidade de uma forma hipotética, mas no questionamento de quais seriam os novos instrumentos necessários para que os arquitetos pudessem aproveitar as oportunidades possíveis pela produção digitalmente mediada. A presente pesquisa, de modo complementar, aponta o estudo e o desenvolvimento das entidades de modelagem (assunto abordado no capítulo 3) como uma das vertentes responsáveis pela evolução do processo digital de projeto e,

---

<sup>86</sup> As formas não convencionais ligadas à arquitetura foram abordadas no capítulo 2 quando se discutiu a história por trás do surgimento do termo “*Non-standard Architecture*” que começa com a exposição de arquitetura de formas não convencionais, no ano de 2003, no centro Pompidou, em Paris. Este evento marcou também, o início do estudo dos conceitos de projeto não-padrão, não-normativo e não repetitivo, conforme apontou Oxman (2006).

consequentemente, da produção digitalmente mediada (o que demonstra como as áreas estão relacionadas).

Wirz (2014) enxerga como paradoxal o entendimento de que justamente a fabricação e a construção (que geraram uma revolucionária mudança processo de projeto) também sejam as áreas que mais demoraram para se beneficiar de suas implicações. Para o autor, este atraso ocorreu devido à uma “série de questões intrínsecas à arquitetura: a complexidade de um organismo de construção, o seu vínculo delicado com o contexto socioeconómico e político e, além do tempo e custos envolvidos na construção de edifícios ambiciosos e imprevistos” (WIRZ, 2014, p. 12).

#### **4.4 A quarta revolução industrial**

Schwab (2016) já vislumbrava a possibilidade de que parte da academia considerasse as mudanças que atualmente ocorrem na sociedade como oriundas da terceira revolução industrial, entretanto o próprio autor afirmava ser esta uma revolução diferente da terceira por três fatores: o primeiro era a velocidade da evolução das áreas envolvidas, que acontece de modo exponencial, ao passo que nas revoluções passadas aconteceram de maneira linear. Para o autor isso era resultado de um mundo profundamente interconectado e, também, das novas tecnologias que geram outras tecnologias de ponta cada vez mais eficazes.

O segundo fator que, para Schwab (2016), referenda a quarta revolução industrial é a largura e profundidade desta mudança que é baseada na revolução digital e combina múltiplas tecnologias que, segundo o autor, estão levando à uma revolução paradigmática sem precedentes na história da humanidade, visto que não transforma apenas o modo de fabricação do objeto em si, mas modifica o próprio ser e a maneira como ele se relaciona com o mundo.

Por último, o autor apresenta o impacto nos sistemas como sendo o fator que envolveria a transformação de sistemas inteiros, (países, empresas, indústrias e a própria

sociedade como um todo). Para Schwab (2016), este impacto aconteceria por dentro e por meio dos próprios sistemas, e por este motivo considerava este o terceiro motivo pelo qual ele enxergava uma quarta revolução industrial e não apenas a continuidade da terceira.

No que tange especificamente a produção industrial, Sacomano e Sátyro (2018) afirmam que desde 1979 já existia a ideia de integrar remotamente as operações industriais com seus fornecedores e clientes, tema abordado no livro *Computer Integrated Manufacturing – CIM* (Manufatura Integrada por Computador) lançado no mesmo ano por Joseph Harrington. Em 1989 foi iniciado um serviço experimental de transmissão de pedidos a fornecedores pela internet, por meio de um grupo de montagem da planta da Chevrolet-Pontiac-GM no Canadá. As dificuldades de implantação e manutenção ocorridas na época eram centradas nos altos custos e na falta de equipamentos. (SACOMANO; SÁTYRO, 2018).

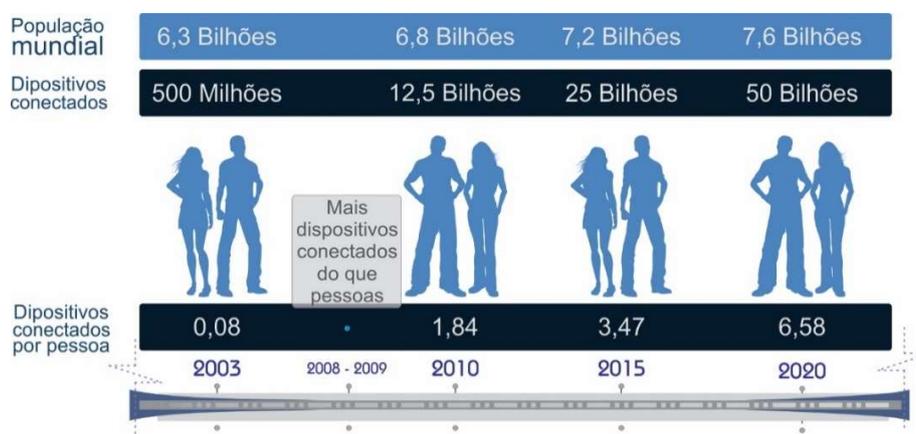
Para Schwab (2016), a quarta revolução industrial vem ocorrendo desde a metade do século XX, e é marcada, segundo Celani e Frajndlich (2016), pelo *Cyber-Physical System* (CPS; em português: Sistema Ciber-Físico), pela *Internet of Things* (IoT; em português: Internet das Coisas), também chamada de *Internet of Everything* (IoE) e pela Internet de Serviços (IoS).

Para explicar a expressão IoT, Miyasaka (2017), com base nos estudos de Ashton (2015), explicou que, em 1999, o britânico Kevin Ashton (que trabalhava no MIT)<sup>87</sup> utilizou o termo IoT em uma palestra para introduzir a ideia de produtos com códigos de frequência com o intuito de facilitar a logística e controle na cadeia de produção (MIYASAKA, 2017). Evans (2011), Witkowski (2017) e Sacomano e Sátyro (2018) afirmam que na virada entre 2008 e 2009 (quase uma década após a introdução do conceito de IoT pelo seu criador) o número de aparelhos eletrônicos conectados à internet excedeu o número de habitantes do planeta terra, e este momento foi estimado pela Cisco IBSG (Cisco *Internet Business Solution Group*) como sendo o verdadeiro nascimento da IoT (figura 71).

---

<sup>87</sup> O grupo Auto ID Center, que consistia em sete universidades de pesquisa em quatro continentes, no qual Kevin Ashton era colaborador, estava pesquisando Identificação de Frequência de Rádio em Rede, ou *Radio-frequency identification tag* (RFID) em inglês, quando apresentou o termo IoT no evento já citado.

Figura 71: Nascimento da IoT



No contexto industrial, a IoT possui dispositivos e inúmeros equipamentos que, dispostos em uma cadeia de elementos com conectividade em tempo real, são capazes de disparar, captar e processar informações entre si, retroalimentando as próprias plataformas que, de modo inteligente, tomam as decisões que devem ser seguidas pela cadeia de produção automatizada (ASHTON, 2015; MIYASAKA, 2017). Já no contexto social, qualquer aparelho eletrônico com conexão à rede mundial de computadores, que receba e envie dados para serem computados e avaliados, pode ser considerado como pertencente à IoT<sup>88</sup>.

Outro elemento base da 4ª revolução industrial é a Internet de Serviços (IoS), para Sacomano e Sátyro (2018) através da IoS é possível disponibilizar novos serviços às empresas por meio de internet ou intranet. Os autores apresentam como exemplo o alerta gerado por *tablet*/celular ou computador com o intuito de avisar que “seu carro precisa de revisão e/ou que chegou o período de trocar os pneus. Isso gera a ida à concessionária e a consequente ordem de produção para os itens que serão trocados durante a revisão” (SACOMANO; SÁTYRO, 2018, p. 35).

<sup>88</sup> Um apontamento que deve ser realizado é a recente ligação do arduino com a IoT, que abre a possibilidade de controlar remotamente objetos/coisas (referência ao *things* da IoT) via rede, por conta de placas, sensores e módulos, que estão cada vez mais acessíveis e educativos.

Em síntese, a IoS trabalha com os serviços que são gerados através de algum aparelho eletrônico com acesso à internet, com o intuito de atender o modo de vida de uma pessoa. Estas “ordens de serviços” enviam “ordens de produção” diretamente para os fabricantes, o que lembra em partes, os conceitos que foram abordados no livro de Joseph Harrington em 1979 (assunto já tratado neste subtítulo).

Ainda sobre os elementos de base da quarta revolução da indústria, Miyasaka (2017) afirma que o Sistema Ciber-Físico foi apresentado por Hellen Gil, em 2008, na 4ª Conferência Anual de Carnegie Mellon, para a Indústria de Eletricidade – Sistemas de Energia do Futuro: Eficiência, Segurança e Controle. A autora do termo (GILL, 2008) define os CPS's como sistemas físicos, biológicos e de engenharia, integrados, que são controlados e monitorados em tempo real por um núcleo computacional, que possui componentes em rede com altos graus de automação e retroalimentação. Para Celani e Frajndlich (2016, p. 162), o CPS pode ser entendido como um “mecanismo controlado por algoritmos baseados em computador e integrado à Internet, que depende da capacidade de processamento e armazenamento, computação diretamente ligada à nuvem”, bem como de acesso direto à Big Data (análise e a interpretação de grandes e variados volumes de dados).

Sacomano e Sátyro (2018) afirmaram que a visão de negócios voltada à transformação digital<sup>89</sup> e à base existente de automação informatizada na indústria possibilitaram o desenvolvimento do conceito de Indústria 4.0 (I4.0), apoiado na IoT, IoS e nos CPS's. Lukac (2015) afirmou que o próprio termo Indústria 4.0 deveria expressar a quarta revolução industrial, ao passo que Pisching (2018) foi enfático ao dizer que a I4.0 foi a expressão pela qual ficou conhecido o quarto paradigma de produção industrial.

O termo (I4.0) foi apresentado pela primeira vez em 2011 na Alemanha, na feira de Hannover, como *sendo Plattform Industrie 4.0* (Plataforma Indústria 4.0) e buscava o desenvolvimento de alta tecnologia visando possibilitar que os “sistemas automatizados

---

<sup>89</sup> Também conhecida como digitalização que, segundo Sacomano e Sátyro (2018, p. 28) é “caracterizada pela onipresença de computadores, tablets e smartphones, conexão à internet e convergência das mídias de comunicação para o formato digital”. A transformação digital possibilitou uma nova geração de consumidores nativos digitais. Para abarcar este nicho de mercado foram criadas estratégias de marketing com foco na análise de redes sociais bem como em grandes bases de dados (*big data*).

que controlam os equipamentos industriais pudessem se comunicar, trocando assim, informações/dados entre máquinas e seres humanos, de forma a otimizar todo o processo de produção” (SACOMANO; SÁTYRO, 2018, p. 23). Para os autores, a linha de produção, presente em uma planta industrial que opera como Indústria 4.0, pode ser acionada e controlada remotamente. Neste caso, cria-se um modelo virtual da linha de produção onde serão realizadas otimizações na mesma, de forma a garantir que, quando implantada, esta otimização resulte na menor quantidade possível de problemas.

Sacomano e Sátyro (2018) apresentaram um exemplo prático e simplificado para explicar a I4.0, neste caso hipotético, o pedido é feito online por um cliente, que imediatamente entra no Planejamento e Controle de Produção. O sistema de segurança da empresa verifica se este pedido é feito por uma pessoa idônea, para que assim a lista de materiais para confecção do produto possa ser gerada automaticamente e o sistema possa verificar se existem os materiais necessários para confecção. Caso não exista um ou outro material, o sistema entra em contato com os fornecedores para verificar os prazos de entrega e compará-los com o pedido inicial.

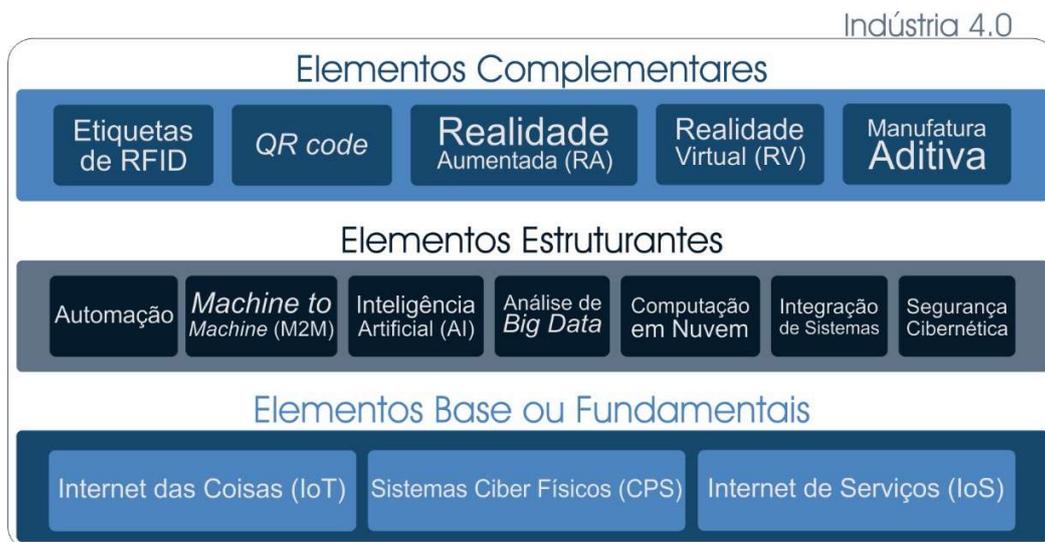
Quando o pedido é fechado com o cliente (após solucionar qualquer problema quanto a estoque), o sistema posiciona o pedido na linha de produção e, caso seja necessário, a reconfigura (por conta de qualquer customização solicitada) e otimiza (com ou sem auxílio de inteligência artificial) a linha de produção através de ambiente virtual para posterior validação por supervisor. Já na produção, sensores e atuadores irão controlar o processo (CPS), passando informações, simultaneamente, sobre o andamento do produto. Estes dados/informações são então armazenados e retransmitidos pela internet ou intranet (SACOMANO; SÁTYRO, 2018).

Os autores relatam que é também na linha de produção que cada estação de trabalho troca informações com outras estações, processo chamado de *Machine to machine* (M2M), ou comunicação máquina-a-máquina. Isto acontece para, por exemplo, alertar a linha de produção acerca de alguma customização realizada diretamente pelo cliente, ou ainda, quando o sistema ordena a redução da produção de determinado componente do pedido, em virtude de futura manutenção do robô “x” que apresenta mau

funcionamento (evitando assim ruptura do mesmo enquanto aguarda o reparo agendado). Neste último caso, o sistema entra em contato também com o setor de manutenção interno da fábrica, processo chamado de comunicação máquina-a-humanos ou, em inglês, *machine to human* (M2H), cujo enfoque relaciona-se com a interação entre máquinas e humanos.

Qualquer que seja o caso, o próprio sistema irá entrar em contato com o cliente para alertar sobre possíveis atrasos no prazo de entrega do pedido que, quando finalizado, será repassado para logística e transportes, podendo ser rastreado pelo cliente. Sacomano e Sátyro (2018) afirmam que indústrias como esta, deste exemplo hipotético, são chamadas de fábricas inteligentes ou *smart factories*. Os elementos fundamentais, os estruturantes e os complementares da I4.0 podem ser observados na figura 72.

Figura 72: Elementos fundamentais, estruturantes e complementares da I4.0



Fonte: Adaptado de Sacomano e Sátyro, 2018

Quando analisado no contexto da construção civil, Leonard (2015) apontou alguns desafios que precisam ser estudados para que haja a implementação da I4.0: a melhoria dos equipamentos de produção, visando o benefício dos ambientes de chão de fábrica; aumento do nível de automação; as diferentes e independentes plataformas de fabricação

necessitam de comunicação direta; componentes com melhores eficiências energéticas, estruturais etc.

Por outro lado, Miyasaka (2017, p. 117) afirmou que “as tecnologias de comunicação e os dispositivos avançados, como tablets, já são empregados em pequena escala, e [...] ocupam espaços em serviços de montagem, automação do processo de fabricação e construção”.

Para Balaguer e Abderrahim (2008), o ambiente de trabalho da construção civil, que geralmente é pouco estruturado, é a maior dificuldade da Robótica e Automação em Construção (RAC). Nestes locais existem insuficientes níveis de industrialização e pré-fabricação, baixos níveis de padronizações, objetos pesados, elementos com grande tolerância (a I4.0 trabalha necessariamente com precisão), sem contar a quantidade de atores envolvidos no processo.

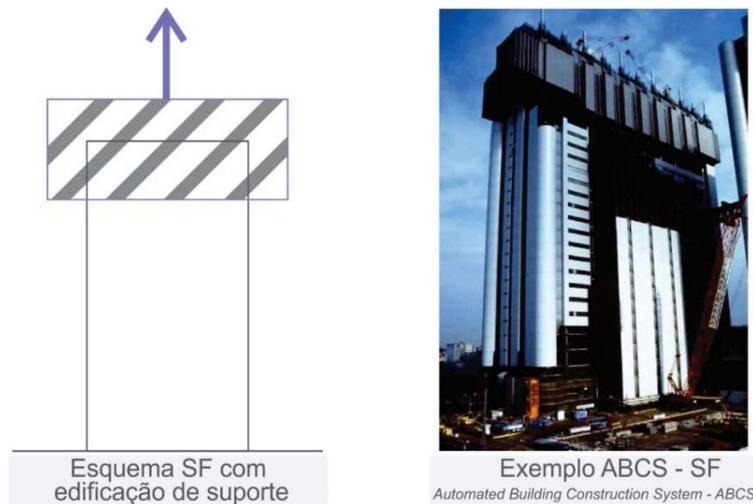
No que tange os assuntos abordados na RAC, Balaguer e Abderrahim (2008), Ponce de Leon e McGee (2014), Andia e Spiegelhalter (2015), Naboni e Paoletti (2015) e Bock e Linner (2016) produziram estudos minuciosos sobre a temática, apresentando diversos modelos (RAC) presentes na AECO. Alguns destes exemplos podem ser contemplados no que Bock e Linner (2016) chamaram de *Sky Factory* (SF), ou fábrica à céu aberto.

As SF's são definidas pelos autores como ambientes que são montados nos canteiros de obras para fabricação *in loco* automatizada e/ou robótica e possuem estrutura similar à de uma fábrica. Estas fábricas<sup>90</sup> podem envolver o ambiente de trabalho completamente (*Closed Sky Factory*) ou parcialmente (*Open Sky Factory*), como exemplifica a figura 73 (BOCK; LINNEN, 2016).

---

<sup>90</sup> Alguns tipos de SF's são capazes de vedar completamente o ambiente de trabalho, possibilitando ambientes à prova de som e protegidos contra intempéries. O maquinário utilizado neste ambiente pode ou não ser controlado remotamente. Exemplos de SF's podem ser encontrados em Bock e Linner (2016), sendo: *Automated Building Construction System* – ABCS, Akatuki 21, *Future Automated Construction Efficient System* – FACES, *Mast Climbing Construction System* – MCCS, *Roof Push-up*, *Roof-Robo*, entre outros. Para mais informações consultar Bock e Linner (2016).

Figura 73: Exemplo de SF



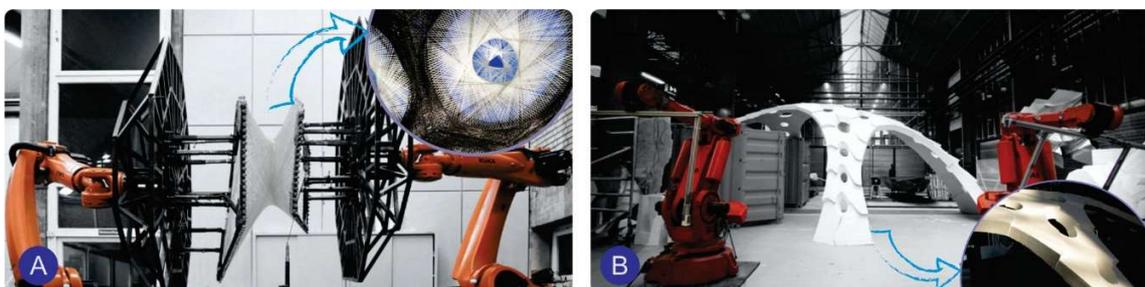
Fonte: Adaptado de Bock e Linner, 2016

A nomenclatura de uma SF pode ser interpretada como uma contradição lógica quando comparada com sua tradução para o português (fábrica à céu aberto com cobertura fechada). Como a presente pesquisa visa apenas demonstrar existência das mesmas, aqui serão tratadas como fábricas à céu aberto. Ressalta-se que, como já descrito no texto, há diversas problemáticas relacionadas à implantação completa da I4.0 na indústria AECO, e, portanto, apresentar aqui as SF's não possui o intuito de defendê-las como modelos de I4.0, mas de exemplificá-las como RAC's.

Ao tratar especificamente da fabricação robótica, Naboni e Paoletti (2015) afirmaram que o robô industrial mais utilizado para fins arquitetônicos é o braço robótico<sup>91</sup>. Segundo os autores, um braço robótico pode ser utilizado para processos de manufatura aditiva, subtrativa, além de manuseio, transformação e montagem de material. Para exemplificar o exposto, os autores apresentaram o pavilhão ICD/ITKE 2013-2014, da universidade de Stuttgart, que foi fabricado com padrões individuais de enrolamento de duplo layer de fibras de carbono e vidro (figura 74 A).

<sup>91</sup> Para Naboni e Paoletti (2015, p. 40) é um “tipo de dispositivo mecânico programável, com funções similares ao braço humano, constituído por sete segmentos metálicos, [...], permitindo o movimento rotacional (robô articulado) ou translacional (linear) ”.

Figura 74: Exemplos de utilização de braços robóticos na Arquitetura



Fonte: Adaptado de Naboni e Paoletti, 2015

A figura 74 B, por sua vez, exhibe a fabricação por ferro a quente (manufatura subtrativa) do *RDM Vault* (o projeto nasceu de uma investigação colaborativa entre o instituto ETH de Zurich e a faculdade de Arquitetura de TU Delft). As peças de Poliestireno Expandido - EPS foram cortadas por um arame fino aquecido por corrente elétrica (200°C), e a estrutura resultante foi tratada com um compósito de gesso, acrílico e fibra de vidro, que proporcionou reforço estrutural, resistência ao fogo e longevidade ao projeto (NABONI; PAOLETTI, 2015).

Dois outros projetos apresentados por Naboni e Paolleti (2015) e que já fazem parte do arcabouço teórico desta pesquisa são: a *Programmed Wall*, exposta no capítulo 2 (figura 29), e a peça estrutural projetada pela Arup através de formação baseada em desempenho e fabricada por sinterização direta de metal por laser (figura 58, capítulo 3).

Ainda no tangente à quarta revolução da indústria, Celani e Frajndlich (2016) abordam outro conceito que está diretamente ligado à I 4.0: a *Smart City*<sup>92</sup>. Segundo Gershenfeld, Gershenfeld e Cutcher-Gershenfeld (2017), este conceito pode ser compreendido como sendo uma cidade em que tudo está conectado e instrumentado para

<sup>92</sup> Albino, Berardi e Dangelico (2015) afirmaram que o termo *Smart* (usualmente associado à inteligente ou digital) surgiu na década de 1990 e relacionava-se com a implementação de Tecnologias da Informação (TI) nas cidades. Já na atualidade, *smart cities* se baseiam em políticas de planejamento que, com auxílio das TI's, podem contribuir com os sistemas de infraestrutura, a educação, a comunicação entre comunidades, o amplo acesso à internet, a mobilidade controlada e informatizada, o monitoramento climático, dentre outros, conforme pontuou Monzon (2015). Possibilita-se, desta maneira, uma maior previsibilidade na resolução de problemas, que resultarão em uma superior qualidade de vida social.

que seja responsivo em tempo real (os dados relativos à vivência humana, manutenção da cidade, fluxo etc podem ser captados, enviados e avaliados em tempo real). Para os autores, este conceito surge como uma tendência popular do planejamento urbano atual e possui, de acordo com Celani e Frajndlich (2016), duas variantes: uma que descende das grandes corporações para a cidade e outra que ascende da própria sociedade.

A variante descendente estaria relacionada, conforme Celani e Frajndlich (2016), com às soluções prontas (tecnologias de ponta) vendidas por grandes empresas, como IBM, Cisco IBSG e Siemens para resolver os problemas urbanos (gerenciamento de energia, tráfego, sistemas de redes inteligentes etc). Estas soluções seriam então adquiridas pelos escritórios de administração da cidade, ao custo de milhões de dólares.

Já o conceito de FabCity, ou a segunda vertente das *Smart Cities* apresentada por Celani e Frajndlich (2016), pode ser considerada uma solução menos passiva quando comparada com a primeira, visto que ascende e depende da própria sociedade, e conta mais com a iniciativa das pessoas do que das grandes corporações.

Neste sentido, Gershenfeld, Gershenfeld e Cutcher-Gershenfeld (2017) afirmaram que a iniciativa utópica de uma FabCity pode ser o próximo passo natural dos paradigmas industriais relacionados à arquitetura e ao urbanismo. Deste modo, esta cidade hipotética, seria capaz de produzir de forma sustentável, além de reciclar o que consome. Celani e Frajndlich (2016) ressaltam que uma FabCity faria uso de tecnologias que foram inicialmente produzidas na terceira revolução da indústria (máquinas controladas por computador com conexão à internet, impressoras 3D etc).

Celani e Frajndlich (2016) explicam ainda que o conceito da FabCity surgiu na 7ª conferência mundial do Fab Lab: a Fab7. As diretrizes englobavam a criação de espaços *Makers* e Fab Labs (onde as pessoas poderiam produzir seus próprios bens de consumo), estações de reciclagem, hortas comunitárias e casas autossustentáveis em termos de reutilização de água e produção de energia. Neste modelo, ao invés de bens físicos, a cidade passaria a importar e exportar dados digitais, o que acabaria por reduzir o fluxo de produtos para a cidade.

Fab City é um novo modelo que tenta devolver às cidades a capacidade de produzir através de micro fábricas inseridas no tecido urbano e conectadas aos cidadãos. O projeto se baseia na criação de processos ascendentes para envolver não apenas profissionais, mas principalmente os cidadãos. Instituições, empresas e indivíduos também são incentivados a participar e contribuir para o desenvolvimento e expansão do projeto, o que oferece uma perspectiva realista de uma rede alternativa de produção e construção (NABONI; PAOLETTI, 2015, p. 21).

*Ao comparar os conceitos de Smart City e FabCity, Celani e Frajndlich (2016) defendem que este último (FabCity) está associada ao treinamento de uma nova geração de indivíduos criativos, ambientalmente conscientes e que, portanto, visam consumir com consciência os recursos do planeta.*

Após a trajetória teórica percorrida por esta pesquisa, é possível notar que as formas não convencionais podem ser executadas através da terceira e quarta revolução industrial, mas se percebe também que para isso é necessário o domínio do processo digital de projeto escolhido, das ferramentas computacionais, além do controle dos próprios métodos de fabricação.

Um questionamento que permanece após estas percepções gira em torno da tradução/adaptação destes novos paradigmas de fabricação industrial voltados para países em desenvolvimento e que, portanto, ainda possuem grande dependência de mão de obra local.

Isto porque, no que tange especificamente a fabricação digitalmente mediada da terceira e quarta revolução industrial atrelada à AECO, um dos fatores que podem dificultar sua implementação é a própria mão de obra, que em países em desenvolvimento tendem a possuir pouca qualificação profissional. Deste modo, buscando reunir os aspectos tecnológicos que englobam estes novos processos digitais de projeto e as particularidades que podem existir na mão de obra regional, Philip Yuan e Franklin Lee/Anne Save de Beaurecueil caracterizaram dois processos de fabricação que podem ser considerados similares ou iguais (dependendo da percepção): um chamado de Regionalismo Paramétrico (*Parametric Regionalism*) e o outro de processo *High-Low* (*High-Low Process*).

#### **4.5 Regionalismo Paramétrico ou Processo *High-Low*: um possível caminho entre a fabricação e a arquitetura paramétrica contemporânea**

Para Yuan (2016), quem fornece uma nova abordagem ao conhecimento arquitetônico e à organização espacial é o design paramétrico, e, por isso, ele deveria incorporar informações e comportamentos locais a partir de uma ampla perspectiva ética e social.

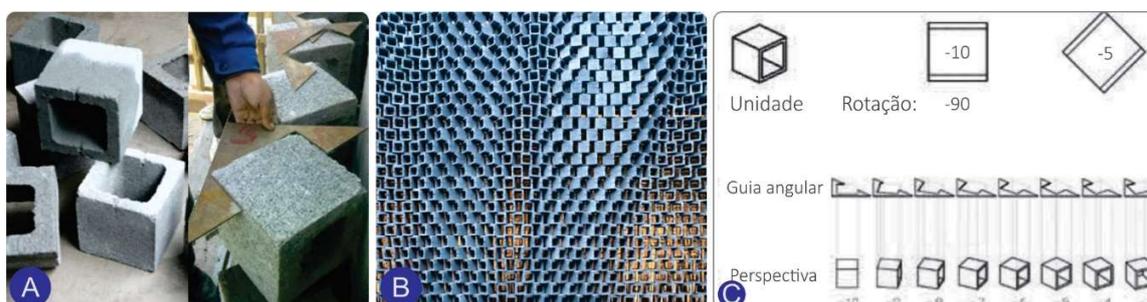
Nesta linha de raciocínio, o autor afirma que o discurso do regionalismo na era digital não deveria apenas refletir o contexto e clima (locais), mas também os próprios aspectos culturais inerentes, como os materiais de construção e a produção social (da qual o ofício artesanal faz parte).

Isto posto, as transformações do comportamento humano, do sistema de produção arquitetônico e da própria ética ecológica, levarão inevitavelmente à uma inovação na morfologia da arquitetura (YUAN, 2016). Por isso, o autor foi provocativo ao dizer que a reforma do paradigma paramétrico deveria ser o objetivo, e não apenas o resultado do mesmo.

É nesta contextualização que Yuan (2016) defende uma fabricação digital atrelada à arquitetura, que passe pelo uso de materiais e mão de obra locais. Esta prática, segundo ele, é capaz de levar à uma redefinição da significância no modo como os arquitetos enxergam, entendem e trabalham com os materiais clássicos de construção. Esta ressignificação passará a ocorrer, para ele, na medida em que os arquitetos prestarem mais atenção no desempenho dos materiais e nas suas lógicas de fabricação (a presente pesquisa concorda com este posicionamento do autor).

Com o intuito de exemplificar o processo de fabricação, caracterizado por Yuan (2016) como regionalismo paramétrico, o autor apresenta na figura 75B a parede de seda (*Silk Wall*), do escritório da Archi-Union, da qual o autor faz parte.

Figura 75: Paredes de Seda feitas por metodologia paramétrica e abordagem regional



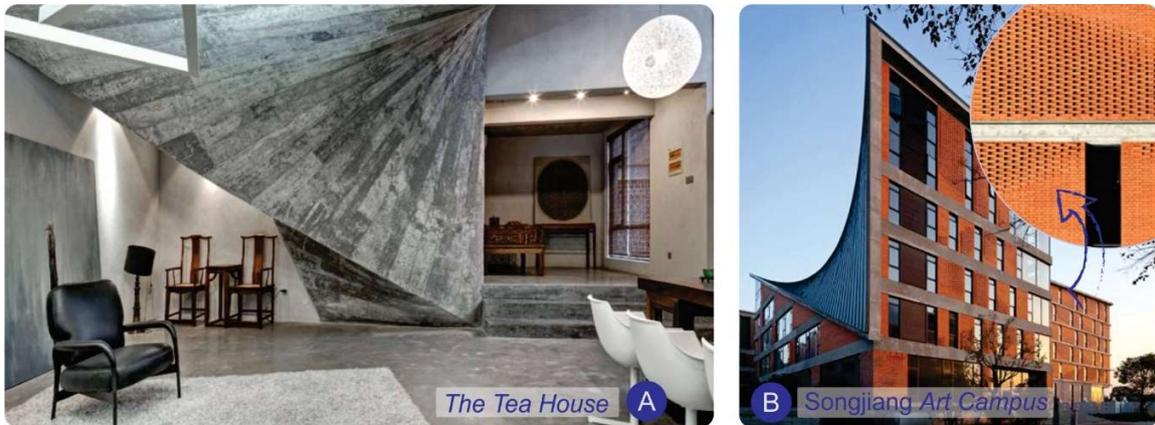
Fonte: Adaptado de Yuan, 2016

Os blocos estruturais desta fachada foram rotacionados (figura 75C) para ocasionar sensação de movimento na mesma (a disposição dos blocos possui ângulos infinitamente variados). Visando racionar e tornar econômico o projeto, esta variação de ângulos foi então reduzida para 21 tipos. Deste modo, o padrão de deslocamento dos blocos de concreto se transformou num simples posicionamento, através de numeração lógica, fácil de ser interpretado pelos construtores, visto que foram utilizadas guias previamente fabricadas em uma cortadora laser (figura 75A), como afirmou Yuan (2016).

Nota-se que para garantir a intenção do processo digital de projeto (sensação de movimento em virtude da disposição de blocos), o escritório de arquitetura precisou traduzir, para os construtores, o modo como esta parede deveria ser fabricada; para isso, foi preciso padronizar a variação angular dos blocos, com o intuito de tornar exequível o projeto.

De acordo com Yuan (2016), a tradução do processo digital para o modo de fabricar de uma obra local é a essência do regionalismo paramétrico. Neste sentido, outros dois projetos alinhados a este processo são: o Campus de Arte de Songjiang (figura 76B) e a casa de chá, ou *The Tea House* em inglês (primeira experiência do escritório utilizando concreto como material), conforme figura 76A. Ressalta-se que ambas edificações foram fabricadas na China pelo escritório *Archi-Union Architects* (YUAN, 2016).

Figura 76: Projetos fabricados com regionalismo paramétrico



Fonte: Adaptado de Yuan, 2016

É possível perceber que o regionalismo paramétrico como processo de fabricação tem o potencial de se tornar um caminho viável na tradução dos projetos oriundos de processos digitais para uma produção com mão de obra local e não especializada.

Com a atenção igualmente voltada para esta discussão, Anne Save de Beurecueil e Franklin Lee apresentaram o projeto da fábrica CoBLOGó em Taboão da Serra – SP (figura 77A e B), cujo processo de projeto digitalmente mediado utilizou o *software* Rhinoceros e o *plug-in* Grasshopper, além do Geco. Para otimizar o posicionamento dos blocos, os arquitetos optaram pelo Galapagos que simulou diversas opções (orientação dos blocos) até encontrar a que melhor respondia à análise ambiental aferida pelo aplicativo Ecotec da Autodesk, possibilitando assim o sombreamento interno demonstrado na figura 77C.

Figura 77: Fábrica CoBLOGó

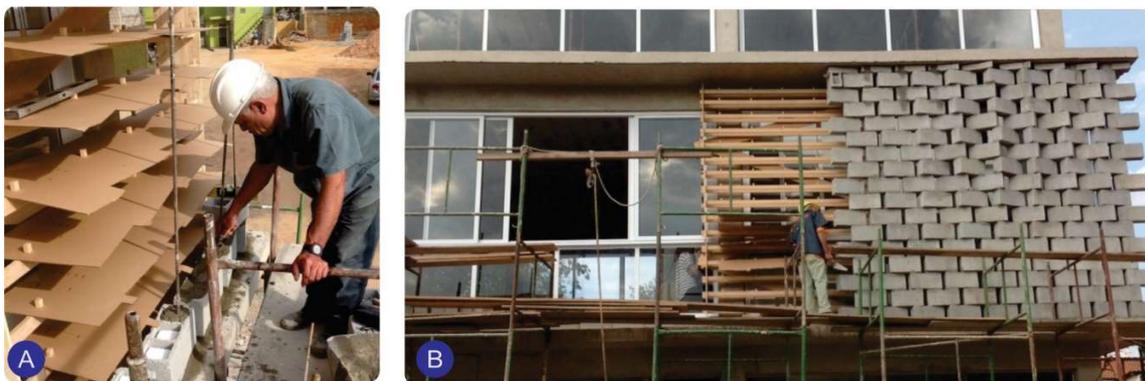


Fonte: Adaptado de Lee et Al., 2015

Lee et al. (2015) afirmaram que esta foi a primeira construção, no Brasil, onde uma fachada foi elaborada por metodologias digitais de projeto e materializada com auxílio de fabricação digital. Segundo os autores, uma fusão *High-Low* foi empregada nesta edificação, tendo estratégias de projeto de alta tecnologia (*High*) sido combinadas com metodologias locais de fabricação de baixa tecnologia (*Low*), criando uma estética digital tropicalizada. Nota-se neste ponto uma evidente aproximação entre os conceitos dos processos *High-Low* de Lee et al. (2015) e Regionalismo Paramétrico de Yuan (2016)<sup>93</sup>.

O processo de fabricação contou com o auxílio de instruções produzidas (guias fabricadas digitalmente pelos arquitetos, conforme figura 78A), para que a mão de obra local, não especializada, fosse capaz de executar, usando materiais locais, a geometria paramétrica (figura 78B) oriunda de processo de projeto digitalmente mediado, conforme apontam Lee et al. (2015).

Figura 78: Processo *High-Low* de Fabricação da CoBLOgó



Fonte: Adaptado de Lee *et al.*, 2015

---

<sup>93</sup> Sales (2015) apontou que Massimo Canevacci, estudioso da cultura digital, afirma que é preciso olhar para o mundo das tecnologias digitais por intermédio de novas lentes, para se produzir um pensamento crítico que se sintonize com as transformações que estão acontecendo. Deste modo, o antropólogo italiano propõe o conceito de “sincretismo glocal” que concilia as tensões entre os termos global e local, sem, contudo, resolvê-las. É possível perceber que este conceito também pode ser compreendido como uma aproximação das discussões oriundas das teorias de fabricações *High-Low* e Regionalismo Paramétrico.

Nesta linha de raciocínio, Lee et al. (2015, p. 25) afirmaram que foi utilizado um *script* paramétrico que gerou “guias” em forma de pente para montar e posicionar os blocos de concreto. Estas guias (feitas de papelão e cortadas à laser) “foram colocadas em um suporte móvel de madeira que foi fabricado por uma Router CNC”. Ainda segundo os autores:

A computação paramétrica foi utilizada para gerar configurações geométricas, e também para construir a própria fachada. *Scripts* paramétricos geraram a sutil gradação de rotação dos blocos, que eram controlados pelas diferentes distâncias dos ‘pontos de atração’. [...]. A fachada também ilustra o conceito de ‘ornamentação ambiental’, onde o ornamento não é mais percebido como meramente decorativo, mas se torna útil na produção de um desempenho ambiental específico, criando um novo tipo de ‘estética funcional’ (LEE et al., 2015, p. 25).

No que tange os processos ora apresentados (regionalismo paramétrico e *High-Low*), esta pesquisa apresentou exemplos de fabricação em que ocorrem a rotação e o assentamento de blocos, com exceção da escada da *Tea House* disponível em Yuan (2016). Isto posto, um possível tópico a ser levantado a partir do dito é referente à viabilização de projetos com processos digitalmente mediados que sejam fabricados por outros materiais, como é o caso do concreto protendido ou os materiais de alto desempenho<sup>94</sup> (compósitos poliméricos).

Neste raciocínio, Herold (2018) apresentou o projeto *Smart Slab* (figura 79A e B), cuja tradução seria laje inteligente. Neste projeto da ETH Zurich, oito professores juntaram-se ao *National Centre of Competence in Research (NCCR)* para construir, conjuntamente

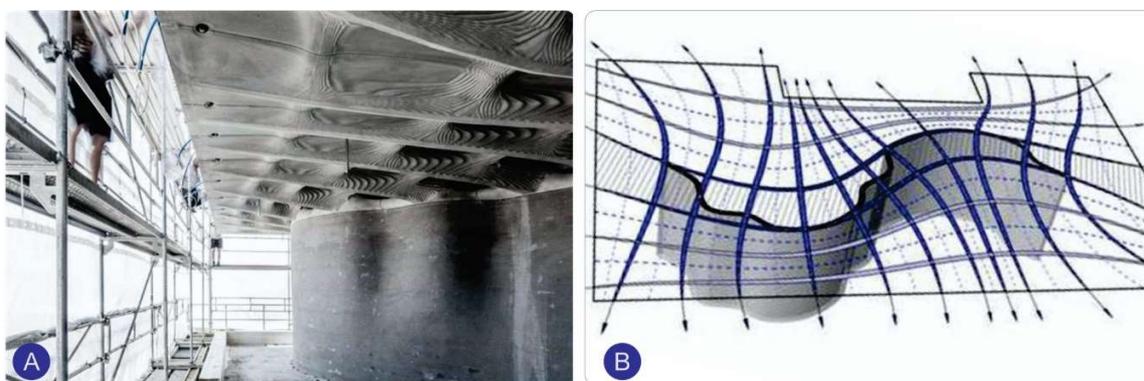
---

<sup>94</sup> Quando se fala em alto desempenho, é preciso sempre definir quais características foram majoradas (física, química ou mecânica). Nesta pesquisa, ao falar de alto desempenho ou alta performance, fala-se, necessariamente, de materiais compósitos poliméricos (matriz polimérica e fibra), visto que, como apontou Marinucci (2011), estes novos materiais oferecem propriedades (flexibilidade de forma, redução de peso, resistência química e elevada resistência mecânica e rigidez) que muitas vezes não são alcançadas pelos materiais tradicionais. Neste sentido, o alto desempenho dos compósitos está diretamente ligado ao teor e à direção das fibras utilizadas, visto que podem melhorar uma e/ou outra característica do material (normalmente a resistência mecânica, o que, por consequência, melhora também o peso da estrutura, uma vez que passa a necessitar uma menor quantidade de material para sua execução). O capítulo 6 apresenta investigações e resultados, cuja fabricação envolve especificamente esta classificação material.

com parceiros da indústria, a *DFAB House*<sup>95</sup> (unidade habitacional localizada em Dubendorf que, quando finalizada, servirá de moradia temporária para pesquisadores visitantes).

Na parte de baixo da laje, segundo Herold (2018), é possível ver (figura 7A) uma ornamental e orgânica estrutura com diferentes hierarquias, onde as vigas transportam as cargas (figura 79B), enquanto as nervuras (vazios) são usadas, principalmente, para acústica e expressão arquitetônica.

Figura 79: *Smart Slab*



Fonte: Adaptado de Herold, 2018

O teto de 15 toneladas e 80m<sup>2</sup> é constituído por 11 segmentos de concreto pré-fabricado (figura 80B) e conecta o andar inferior da *DFAB House* com os dois andares superiores. A laje (figura 80A) combina a resistência estrutural do concreto com a liberdade formal de projeto possibilitada por impressão 3D do molde e, em seu ponto mais fino possui

<sup>95</sup> A casa DFAB começou a ser construída em maio de 2017, com a execução da parede *Mesh Mould*, e está programada para ser finalizada até o fim de 2019, conforme apontamentos de Herold (2018), que afirmou também que a *DFAB House* é o primeiro edifício do mundo a combinar vários processos inovadores de construção digital. Ressalta-se que diversas etapas de execução da *Smart Slab*, foram realizadas por mão de obra específica, fato este, que pode ir na contramão do que defende o regionalismo paramétrico, entretanto, além da montagem dos elementos ter sido feita por mão de obra local, esta obra poderia, com a o devido auxílio e tradução/instrução, ser construída por uma mão de obra, sem instrução, desde que houvessem os mesmos maquinários.

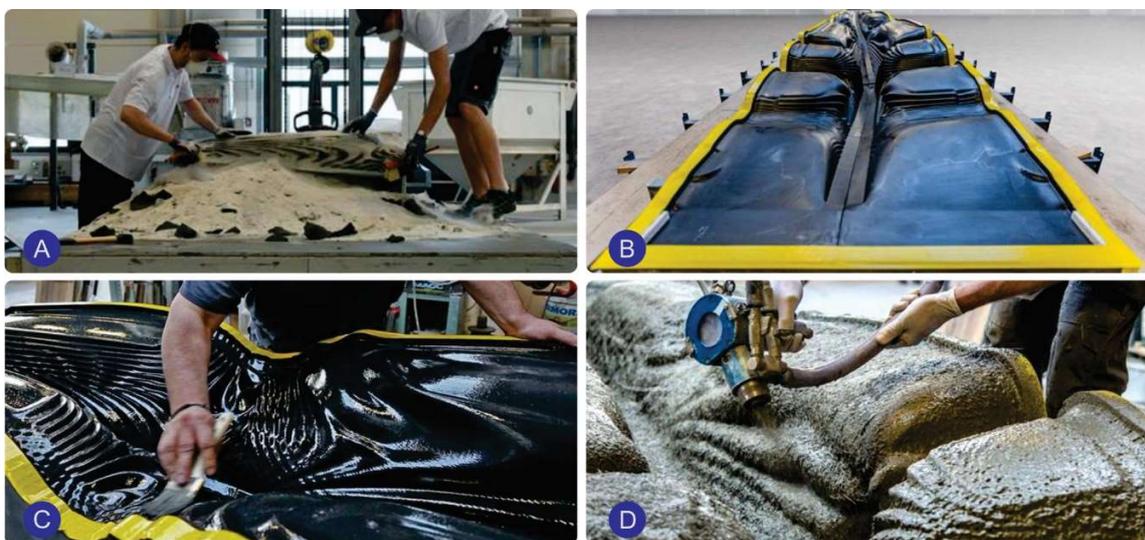
20 mm de espessura, pesando menos da metade do peso de um teto convencional de concreto (HEROLD, 2018).

Figura 80: Posicionamento da *Smart Slab*



Fonte: Adaptado de Herold, 2018

Para garantir a integridade formal do processo digital de projeto, a equipe utilizou, além da estrutura de madeira feita por uma cortadora à laser, uma impressora de areia 3D de grande escala (que produziu os moldes em uma espécie de arenito artificial), conforme figuras 81A e B. Após a aplicação de desmoldante (figura 81C) os moldes foram então preenchidos com *Glass Fiber Reinforced Concrete* (GRFC), ou Concreto Reforçado com Fibra de Vidro (figura 81D), o que garantiu precisão milimétrica, além da estabilidade necessária com um consumo bem menor de material em virtude da otimização realizada na fase de projeto (HEROLD, 2018).

Figura 81: Construção da *Smart Slab*

Fonte: Adaptado de Herold, 2018

Neste projeto onde estática e ornamentação caminharam juntos, os pesquisadores desenvolveram um *software* para auxiliar a fabricação dos moldes. Este programa coordenava todos os parâmetros relevantes para a produção. Desta feita, foi preciso digitalizar dados das dimensões da sala, e da própria parede curva (digitalizada com precisão milimétrica), que é também o principal suporte da laje, conforme Herold (2018). A autora explicou ainda que através do *software* foi possível otimizar a estrutura da laje para que em cada ponto houvesse apenas a espessura necessária para garantir a rigidez e fluxo de carga.

A montagem dos 11 elementos da laje ocorreu após duas semanas de endurecimento do concreto e foi executada com o auxílio de um guindaste que posicionou cada segmento sobre a parede curva. Após o posicionamento de todos os elementos, houve a aplicação da protensão, tendo os trabalhadores puxado (no sentido do comprimento e da transversal) os cabos de aço que foram responsáveis pelo aumento da resistência de carga do sistema, conforme explicação de Herold (2018).

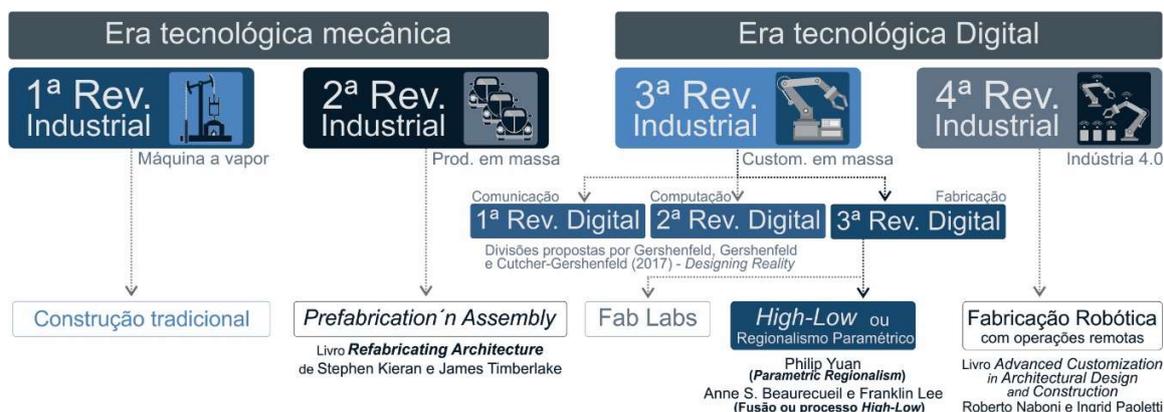
Após analisar estes projetos, é possível concordar com a afirmação de Yuan (2016) de que, para efetivar construções oriundas de processos paramétricos (ele se refere aos exemplos demonstrados em seu artigo), é preciso que os arquitetos forneçam as “ferramentas de posicionamento personalizadas para ajudar os construtores a determinar a localização de cada tijolo” (mesmo concordando com o autor, esta pesquisa utilizaria a expressão “elemento construtivo” no lugar de “tijolo”, para que a ideia não se restrinja à apenas este material. O capítulo de resultados apresenta investigações alinhadas à esta nova abordagem).

Para Yuan (2016), o regionalismo paramétrico é capaz de estabelecer um modelo pioneiro para a reforma da tectônica arquitetônica regional. Este processo de fabricação, cuja precisão possui dependência com a instrução dada (disponibilizada pelo projetista) e com a habilidade de quem constrói, é capaz de garantir a produtividade e a economia da construção, além da capacidade de garantir a integridade da intenção projetiva.

O autor entende que a ideia por trás dessa metodologia de fabricação digital com baixa tecnologia construtiva (que integra processo digital de projeto e ofício artesanal local) “é preencher a lacuna entre a ideologia paramétrica avançada dos arquitetos e a experiência construtiva dos construtores locais” (YUAN, 2016, p. 95), além de lhes motivar a criar uma nova arquitetura, baseada em desempenho, que esteja dentro de um contexto regional.

Neste sentido, com o intuito de ordenar os modelos de fabricação arquitetônica baseados nas revoluções industriais discutidas neste capítulo, apresenta-se a figura 82, que também indica o processo construtivo escolhido pela presente pesquisa (regionalismo paramétrico) para fabricar as investigações propostas. Ressalta-se ainda que esta figura também aponta, exemplificativamente, não exaustivamente, os teóricos que estudaram cada paradigma.

Figura 81: As revoluções da indústria e os modelos de fabricação



Fonte: Autor, 2019

Neste ponto do trabalho já é possível concordar com o pensamento de Pottman et al. (2007) quando afirmaram que o conhecimento geométrico (capítulo 3), combinado com novos processos digitais de projeto (capítulo 2), cria abordagens inovadoras para a manufatura e a fabricação de formas não euclidianas ou, como demonstrou este capítulo, cria novas abordagens construtivas para trabalhar com mão de obra local e materiais convencionais (regionalismo paramétrico).

Deste modo, como a pesquisa considera que já abordou os assuntos necessários para compreender, produzir e testar a hipótese proposta, a partir deste ponto são apresentados os materiais que foram utilizados no processo metodológico.

## **Capítulo 5 - Procedimentos metodológicos**

Para abranger de maneira eficiente as vertentes abordadas na pesquisa, foram utilizados diferentes procedimentos metodológicos. Assim, este trabalho apresenta um caráter de cunho exploratório, experimental, descritivo e de aplicação, vez que ao mesmo tempo em que explora e descreve o assunto, procura estabelecer relações entre as variáveis, indicando a aplicação de propostas para o problema estudado, e para isto, se vale da metodologia experimental.

Conforme as considerações de Gil (1999), uma pesquisa de cunho exploratório pretende, ao oferecer uma visão geral do fato<sup>96</sup>, formular problemas mais precisos e subsidiar questões pesquisáveis. Breen (2002) complementa o exposto ao dizer que este tipo de abordagem<sup>97</sup> parte de um conjunto de suposições admissíveis para identificar uma problemática, e assim, formular hipóteses. A pesquisa de aplicação, por sua vez, é aquela que propõe que algo seja aplicado (oferecido) ao assunto explorado e descrito (GIL, 1999).

### **5.1 Abordagens em pesquisas orientadas por projetos**

No que tange o campo de estudo metodológico dentro da área de processo de projeto de Arquitetura e Urbanismo, Fokkema (2002) explica que o programa de necessidade (escopo do projeto ou objeto de estudo) é derivado de um contexto técnico, econômico, e deve levar em conta as considerações, políticas, culturais, espaciais e

---

<sup>96</sup> Breen (2002) pontua que a abordagem ao fato estudado na pesquisa descritiva ocorre por meio da explicação detalhada do mesmo, através do estudo/análise dos documentos de origem e assuntos subjacentes.

<sup>97</sup> Uma pesquisa que utiliza abordagem exploratória, geralmente trabalha com perguntas que usem os termos: “como”, “o que” e/ou “por que”, na definição do problema a ser estudado (BREEN, 2002).

ecológicas, razão pela qual o arquiteto deve possuir uma sensibilidade multifacetada para trabalhar estes quesitos, além de criatividade e curiosidade de explorar novas formas.

Para o autor, não existe um único método científico capaz de trabalhar com todos estes temas, sendo este um dos motivos que acarretou a organização de comitês específicos para discutir sobre a temática. Nestes comitês haviam aqueles que defendiam a ideia de que o método clássico empírico-científico, atrelado à teoria dos sistemas (discutidos no capítulo 2), seria o suficiente para um arquiteto que possuísse pensamento científico. De outro lado, alguns teóricos advogavam que existiam diversos métodos distintos, e que todos poderiam ser definidos como científicos (cada qual aplicado às tarefas e desafios locais). A síntese desta discussão foi a definição de oito eixos metodológicos<sup>98</sup> diferentes (figura 82), que se referem às metodologias acadêmicas de pesquisa em Arquitetura e Urbanismo, conforme descrição de Fokkema (2002):

Figura 82: Eixos de pesquisa em projeto após comitê da TU-Delft



Fonte: Autor, 2019

Fokkema (2002) afirmou que: as pesquisas em *Naming and describing* realizam descrições e nomeações de componentes e conceitos do projeto; os estudos da *Typological research* trabalham com a variação de contextos para encontrar ‘tipos’ que podem ser generalizados; o *Design study* varia um objeto (documentando as decisões projetuais) para adequá-lo a um contexto; o *Study by design* permeia a busca metodológica do objeto e do contexto, na

<sup>98</sup> As formas metodológicas de estudo apresentadas por Fokkema (2002) foram definidas após dois comitês da Faculdade de Arquitetura da Universidade Técnica de Delft (TU-Delft), um em 1990 e outro em 2000.

qual a trajetória e o resultado devem ir, necessariamente, além de processos já conhecidos; e o *Design research*, por sua vez, relaciona-se com a documentação, análise e generalização das decisões do processo de projeto (FOKKEMA, 2002).

De acordo com Breen (2002), neste eixo de trabalho é possível aprimorar a percepção de possíveis soluções de um problema projetivo, visto que se estuda, empiricamente, os meios de concepção de um projeto, juntamente com as mudanças que ali ocorrem.

Como os processos aqui relatados são pesquisas contemporâneas em metodologias de projeto, é preciso ressaltar que a definição destes eixos de estudo, pelos comitês, é recente. Deste modo, os teóricos discordam em alguns aspectos caracterizadores, como por exemplo a necessidade condicionante da existência da hipótese durante a pesquisa. Isto posto, a presente investigação não busca adentrar nestas discussões, mas aponta a existência das mesmas.

Portanto, baseado nas caracterizações teóricas onde ocorrem concordâncias entre os autores, definiu-se para o presente trabalho, o uso do *Design research*<sup>99</sup> como método de pesquisa orientada por projeto. Esta escolha ocorreu em virtude dos resultados das investigações (capítulo 6), que apresentam a documentação, análise e generalização das decisões dos processos de projeto e de fabricação estudados. Meyer (2002), ao discorrer sobre a análise metódica presente neste tipo de pesquisa, afirmou que através dela é possível confirmar se o projeto conseguiu alcançar seu objetivo dentro do contexto dado.

### **5.1.1 *Design Research***

Breen (2002) aponta que a pesquisa orientada por processos de projeto envolve a concepção e a percepção da metodologia projetiva além do próprio resultado (produto),

---

<sup>99</sup> Ressalta-se que embora Fokkema (2002) utilize a expressão projetos existentes como condicionante da pesquisa em *Design Research* (o que seria para ele uma pesquisa de algo já projetado), De Jong e Van der Voordt (2002) não apresentam esta condicionante. O presente trabalho segue a linha de raciocínio de De Jong e Van Der Voordt (2002).

sendo utilizadas nestas investigações técnicas comprovadas ligadas aos ciclos de pesquisas empíricas reconhecidas.

Nas pesquisas que trabalham com *Design Research* existem, mesmo que implicitamente, comparações entre projetos, comparações estas que podem ocorrer ainda que o estudo se restrinja à uma variável/projeto ( $n = 1$ ), o que caracterizaria um estudo casuístico como definiram De Jong e Van Duin (2002). Nestes casos, as comparações ocorrem com o contexto da formação e experiência profissional do próprio arquiteto investigador. Em outras palavras, existirá, em casos como este, uma comparação mesmo que implícita com outras referências arquitetônicas já conhecidas pelo pesquisador.

A análise, nestas pesquisas, começa no momento em que é feita a descrição do contexto<sup>100</sup>, projeto, objeto, ou escopo/programa de necessidades, e havendo alguma referência de outro projeto existente, é preciso documentá-la já nesta fase, conforme Breen (2002).

O processo de projeto é documentado, conscientemente, em benefício do estudo, através do qual esboços projetivos e modelos de desenvolvimento, opções intermediárias e resultados, podem ser usados para ilustrar e motivar o produto final e colocá-lo em uma perspectiva mais ampla. [...] Tais abordagens podem ser valiosas, porque oferecem *insights* acerca do domínio da tomada de decisões de projeto e, muitas vezes, desempenham um papel significativo no ensino de projeto (BREEN, 2002, p. 140).

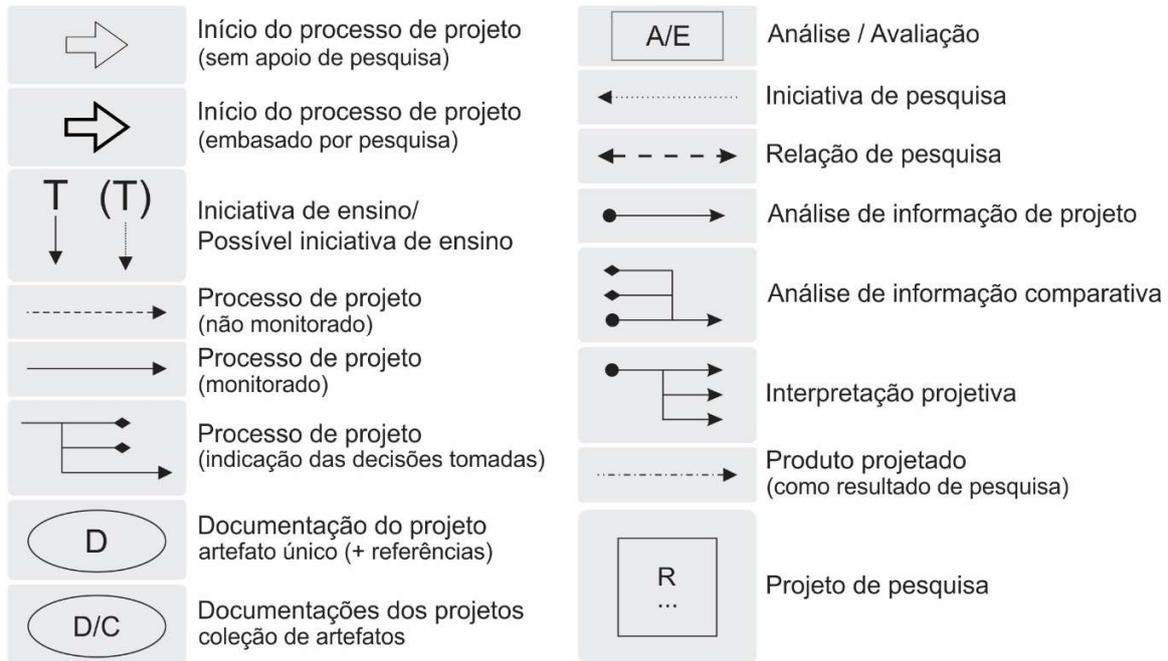
Para que o processo projetivo possa ser estudado sob um viés metodológico são utilizados fluxogramas dos procedimentos que englobam a concepção do projeto, contexto no qual Breen (2002) apresentou os símbolos utilizados em esquemas de pesquisas orientadas por processos de projeto<sup>101</sup> (figura 83).

---

<sup>100</sup> De Jong e Van Duin (2002) apontam que a o local, a planta de situação e o programa de necessidades fazem parte do contexto.

<sup>101</sup> Os símbolos utilizados fazem parte de metodologia de análise de processo de projeto de pesquisadores que publicam em língua inglesa, para manter relação com a literatura, optou-se por representá-los com as mesmas letras. Foram traduzidos os significados de todos os símbolos procurando respeitar ao máximo o

Figura 83: Símbolos utilizados em fluxogramas de pesquisa de processo de projeto



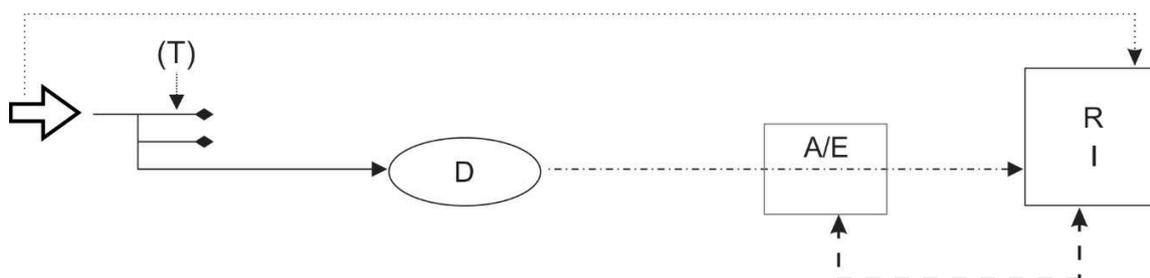
Fonte: Adaptado de Breen, 2002

Os pontos suspensivos presentes no símbolo utilizado para projeto de pesquisa (R ...) fazem referência a um dos oito modos que orientam as pesquisa de processo de projeto, onde cada número romano equivale à um tipo: *Individual process based research* (I), *Thematic process based research* (II), *Design workshop based research* (III), *Designerly workshop based research* (IV), *Individual result based research* (V), *Comparative result based research* (VI), *Design data comparison based research* (VII) e *Designerly interpretation based research* (VIII)<sup>102</sup>. Ressalta-se que as investigações da presente pesquisa se enquadram no primeiro caso (I), um exemplo de fluxograma que ilustra tal processo foi apresentado por Breen (2002), conforme figura 84:

sentido original do termo/expressão. Por fim, apenas os símbolos referentes aos inícios de processos de projeto (com e sem apoio de pesquisa) foram ligeiramente alterados, mantendo o mesmo sentido e relação com a referência original estrangeira.

<sup>102</sup> Para maiores informações e delimitações sobre os processos mencionados consultar Breen (2002).

Figura 84: Exemplo de pesquisa de processo de projeto do tipo I



Fonte: Adaptado de Breen, 2002

As pesquisas orientadas por projetos têm em seu âmago a possibilidade de desenvolvimento de protótipos, de modo que tais pesquisas se voltam, dessa forma, tanto ao estudo do processo quanto ao desenvolvimento do produto. Estas pesquisas possuem uma sequência de projeto – teste – (re)projeto, podendo existir vários ciclos até que se atinja uma solução ótima (DE JONG; VAN DER VOORDT, 2002). Os resultados das investigações exploradas no capítulo 6 também utilizam o desenvolvimento de protótipos durante seus respectivos processos.

## 5.2 Equipamentos e materiais utilizados

Os softwares utilizados nos processos digitais de projeto investigados foram o Rhinoceros 5.0, com os *plug-ins* Grasshopper (editor gráfico de algoritmo), RhinoVault 1.4.0.1 (realiza *form finding* estrutural em cascas) e Karamba 1.1.0 (análise e *form finding* estrutural). Nas últimas duas investigações, optou-se pela utilização do FUSION 360 (modelador sólido que permite a utilização de *T-splines* e faz otimização topológica) e do SolidWorks 2018 (modelador sólido que também faz otimização topológica). Para análise das malhas que definiam a geometria do primeiro estudo utilizou-se o software Blender 2.79.

Em relação aos materiais utilizados, é preciso ressaltar que os dados de caracterização dos mesmos foram disponibilizados e assegurados pela empresa que os

forneceram. Desta forma, nos parágrafos que seguem descreveremos, brevemente, os materiais utilizados.

Os reforços utilizados nos compósitos (material produzido por resina e tecido ou matriz e reforço) foram manta de fibra de vidro 450 g/m<sup>2</sup> (figura 85A) e tecido bidirecional de fibra de carbono 200 g/m<sup>2</sup>, com 5 fios em cada direção (U e T), de tamanho 130 cm x 0,33 mm (figura 85 B). Utilizou-se também fios naturais de piaçava oriunda de vassoura na terceira investigação da pesquisa.

Figura 85: Reforços dos materiais compósitos utilizados na pesquisa



Fonte: Autor, 2019

Tecido *Peel Ply* de poliamida (figura 86A) desmoldante branco (promove adesão secundária, ideal para laminação manual, laminação à vácuo e infusão à vácuo), fornecido pela empresa Barracuda, na quantidade de 2 m<sup>2</sup> (tamanho 50 x 90 cm) e filme desmoldante (figura 86B) perfurado WL3900 (150 x 50 cm), na quantidade 2 m<sup>2</sup>. Segundo informações da empresa Barracuda, este filme possui área de sangramento de resina de aproximadamente 1%, pelos furos espaçados homogeneamente, compatível com resina poliéster, estervinílica e epóxi, e a temperatura de operação alcança até 157°C.

Figura 86: Peel Ply e filme desmoldante perfurado



Fonte: Autor, 2019

Manta aerada para sistemas de vácuo (*BREATHER*) responsável pela absorção do excesso de resina no sistema (figura 87A), fornecido pela empresa Barracuda, na quantidade de 2 m<sup>2</sup> (tamanho disponível 100 x 100 cm) e filme de vácuo WL7400 de alta temperatura (200°C) para infusão e laminação à vácuo (figura 87B), comercializado pela empresa Barracuda, o filme possui multicamadas de Nylon com 75 microns de espessura.

Este filme de vácuo evita o aparecimento de perfurações no processo de instalação do vácuo e pode ser utilizado em temperaturas de exposição e processamento de até 200°C, possuindo limite de deformação de 400%.

Figura 87: *Breather* e filme de vácuo



Fonte: Autor, 2019

Para selar o sistema de vácuo utilizaram-se duas formas, primeiro testou-se com fita polimérica adesiva selante para filme de vácuo TACKY TAPE (figura 88A), comercializada com quantidade de 15 metros lineares (1,5 cm x 15 m). O segundo modo testado foi com canaletas de alumínio e mangueiras de borracha (figura 88B).

Figura 88: Fita polimérica adesiva e canaleta metálica com mangueira de borracha



Fonte: Autor, 2019

Para a fabricação digital do molde foram utilizadas uma Fresa de Comando Numérico Computadorizado (CNC) e uma máquina de corte à laser. O isolamento do molde foi feito com massa de polir nº 2 da marca Pérola; cera Tec Glaze (figura 89A) e desmoldante poli (álcool vinílico) – PVA (figura 89B). As resinas utilizadas para fabricar os materiais compósitos foram: epóxi HEX 135 (3 Kg) com endurecedor *Slow* HEX 135 (1 Kg), e resina poliéster cristal AZ1.0 com catalizador Butanox M50, conforme figura 89C. Por último, para retirar qualquer tratamento químico das fibras naturais de piaçava utilizou-se soda caustica da marca Bradoc (figura 89D).

Figura 89: Materiais utilizados na fabricação dos compósitos poliméricos



Fonte: Autor, 2019

Na penúltima investigação da pesquisa o ensaio de emissividade das superfícies foi realizado por meio de emissômetro. Para a temperatura de superfície utilizou-se uma termocâmara de marca Flir E40. A temperatura ambiente e de globo, umidade relativa e iluminância foram medidas por meio de sensores colocados no interior das envoltórias.

Na última investigação da pesquisa a caracterização da resistência mecânica do material (lâmina de compósito) foi realizada de acordo com a *American Society for Testing and Materials — ASTM D3039/D3039M-14 (2014): Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ou teste padrão para aferir a tração de materiais compósitos de matriz de polimérica.

*Where there is matter, there is geometry.*

*Johannes Kepler*

## **Capítulo 6 - Exemplos e investigações**

Para abordar e aperfeiçoar os processos de projeto e de fabricação estudados durante a pesquisa, foram realizadas diferentes investigações que serviram como retroalimentação do ciclo de desenvolvimento de projeto. Nas quatro pesquisas orientadas por projetos deste capítulo, são apresentados fluxogramas das metodologias utilizadas no projeto e na fabricação, à exceção da segunda fase investigativa, por explorar somente as complicações de produção com materiais compósitos oriundas da primeira abordagem investigativa, isolando-se assim a variável formal.

Nesta parte do trabalho também são descritos e analisados os pontos positivos e negativos encontrados durante a fase experimental. Estas informações foram então utilizadas para refinar as metodologias utilizadas, para no fim culminar na definição generalista de um fluxo de procedimentos (projeto e fabricação) oriundos de processos de projeto digitalmente mediados e materializados por compósitos poliméricos. Por último é preciso ressaltar que a decisão de colocar os processos neste capítulo ocorreu em virtude de estes serem parte dos resultados desta pesquisa orientada por projeto, conforme discussões do capítulo 5.

### **6.1 Abordagem aos processos de projeto e de fabricação**

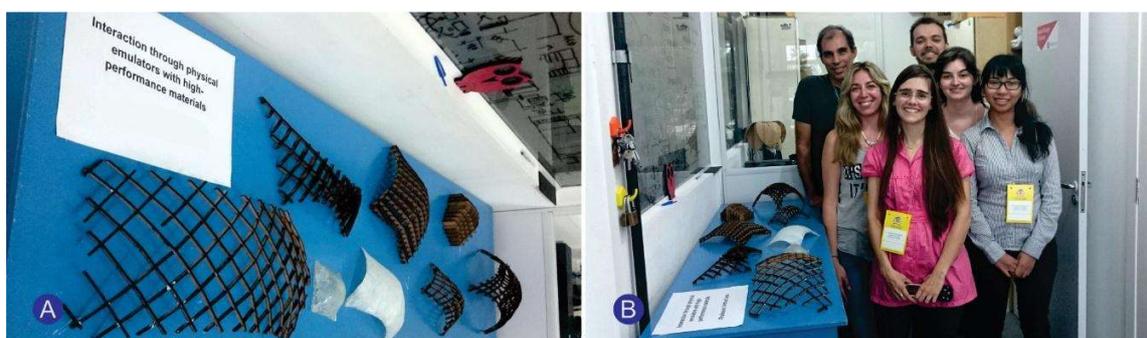
Como a ideia era trabalhar com materiais compósitos, foi preciso primeiro aprender como fabricá-los, uma vez que estes exigem uma série de procedimentos específicos. Assim, com o intuito de compreender as possíveis metodologias de produção, foram realizados cursos nas áreas de laminação manual e à vácuo, e infusão à vácuo.

Os cursos foram ministrados pela Associação Latino Americana de Compósitos (ALMACO) e aconteceram no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) na USP em 2015.

Durante este período na pesquisa já havia preocupação em adaptar e simplificar as etapas e processos para tornar possível a reprodução dos mesmos, sem grandes complicações, por mão de obra não especializada.

Para validar os processos investigados, foi proposto o minicurso intitulado: *interaction through physical emulators with high-performance materials* (interação através de emuladores físicos com materiais de alta performance). Naquele momento foram exploradas morfologias, oriundas de processos convencionais e digitais que foram fabricadas com materiais compósitos (figuras 90A e B).

Figura 90: Participantes do minicurso e morfologias por eles produzidas



Fonte: Autor, 2019

O minicurso foi ministrado em 2016 no Congresso da Sociedade Iberoamericana de Gráfica Digital (SIGraDi) e se iniciou com a proposta de exploração morfológica como variável investigativa; assim, a composição formal foi estudada por intermédio de três modelos: geométrico, algoritmo e de formação baseada em desempenho.

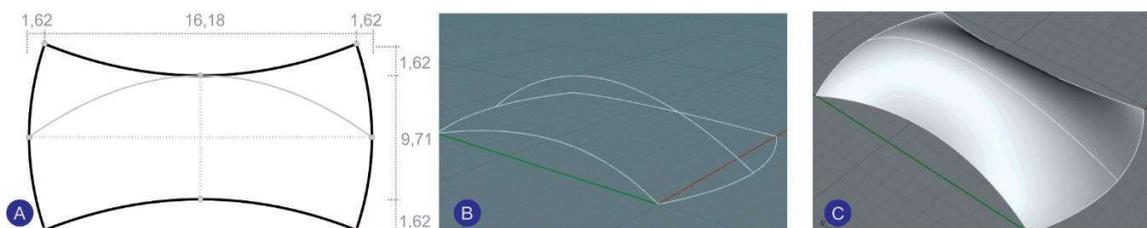
No modelo geométrico (*form making*) a forma foi modelada por meio de precisão manual através de mouse computacional. Nesta metodologia o computador foi utilizado ainda como prancheta digital, visto que a gênese morfológica foi oriunda de processo mental do arquiteto. No algorítmico (que neste caso também se caracterizou como *form making*) o resultado final foi alcançado através de editor gráfico de algoritmos (Grasshopper) e possui precisão matemática, ao passo que no modelo de formação baseada

em desempenho (*form finding*) a forma foi revelada após algumas condicionantes simuladas por meio de emulador físico (RhinoVault). A partir deste momento o computador passou a auxiliar na gênese projetiva, visto que apresentou a melhor solução no que tange o desempenho estrutural, dadas as condicionantes estipuladas.

Todos os processos utilizaram o software Rhinoceros para que os participantes pudessem experimentar os diferentes paradigmas projetivos. O *plug-in* RhinoVault foi utilizado como emulador físico e como processo digital de projeto. Por fim, para comparar os resultados das análises de elementos finitos (FEA) realizadas nos modelos empregou-se o *plug-in* Karamba<sup>103</sup>.

Nas investigações da forma optou-se pela utilização de uma variável de controle geométrico: um esboço com proporções áureas (figura 91A). Esta variável foi utilizada em todos os modelos estudados para garantir a comparabilidade dos mesmos.

Figura 91: Exploração formal por modelo geométrico de precisão por mouse



Fonte: Autor, 2019

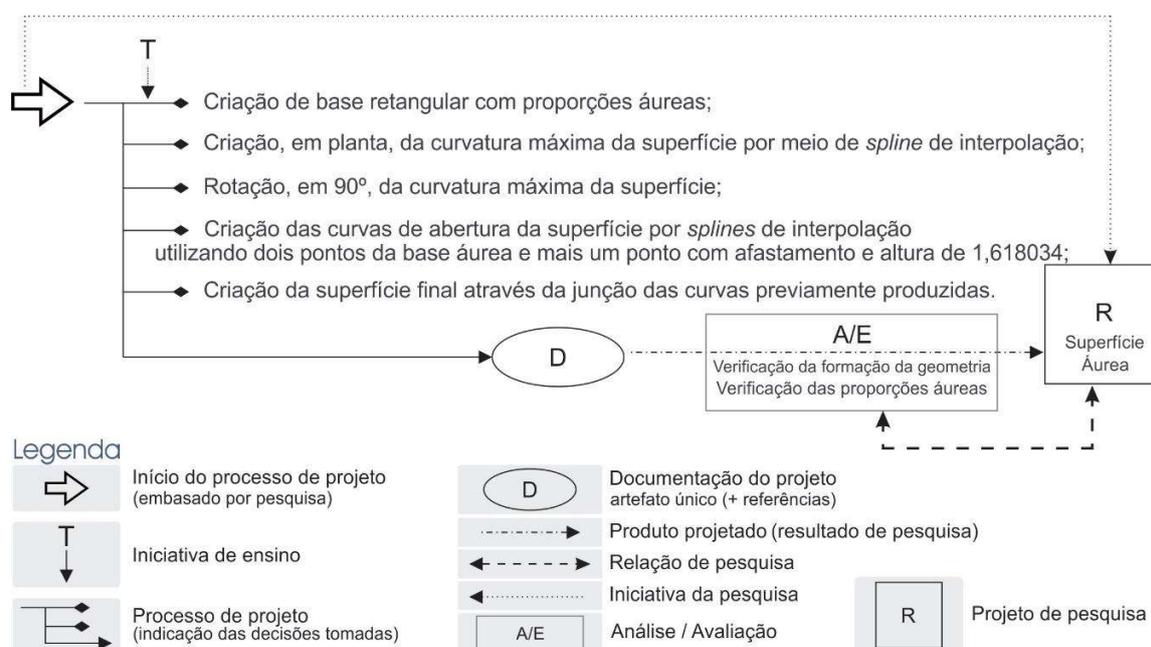
No processo de projeto por precisão manual através de mouse, após utilização de curvas *splines* de interpolação para modelagem, em planta, das arestas curvilíneas (figura 91A), procedeu-se à rotação em 90° da curvatura máxima da superfície, e depois se criaram as curvaturas de abertura da mesma. Deste modo, conseguiu-se um modelo *wireframe* da superfície com proporções áureas (figura 91B), sendo que a forma final (figura 91C) foi feita

---

<sup>103</sup> O *Karamba* é um *plug-in* do *Grasshopper*, que trabalha como ferramenta de engenharia estrutural paramétrica de análise de elementos finitos de treliças espaciais, estruturas de seção ativa (viga, pilar e laje) e cascas.

pelo comando do *Rhinceros* que cria superfícies por meio de uma rede de curvas. O fluxo metodológico deste processo de projeto é apresentado na figura 92.

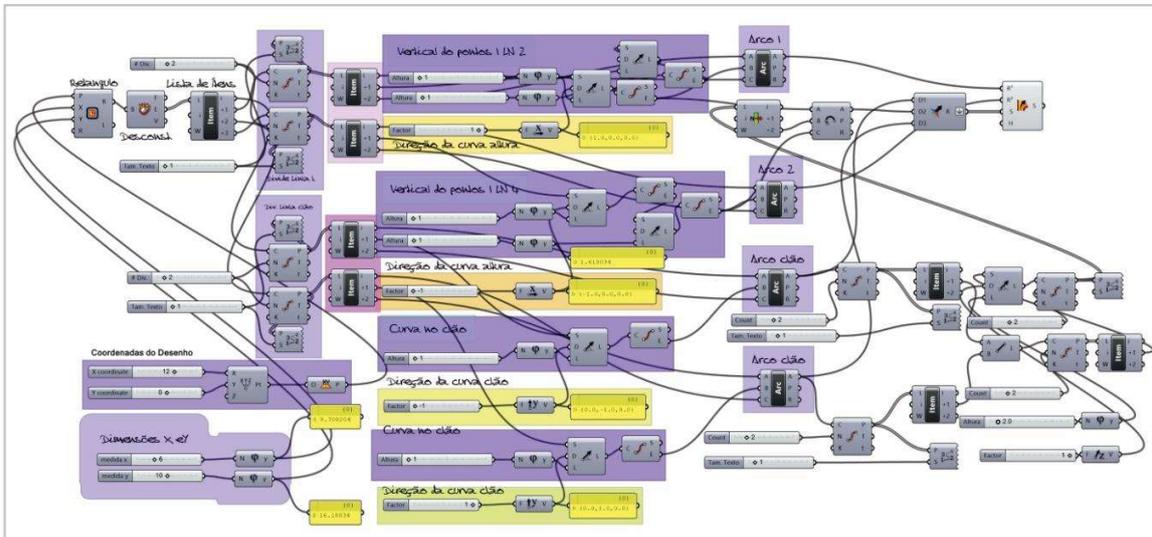
Figura 92: Fluxograma do processo de projeto de precisão por mouse computacional



Fonte: Autor, 2019

No modelo algoritmo foi explorado um raciocínio que perpassa pela geometria diferencial além da matemática subjacente à forma para composição. Neste modo, além do *Rhinceros* utilizou-se o *Grasshopper* para produzir o algoritmo da superfície (figura 93). Após a programação do mesmo foi possível perceber que os participantes do curso encontraram uma dificuldade inicial neste modo de modelagem, visto que a concepção passava por diferentes elementos primários (era preciso que fossem definidas as instruções, por vezes matemáticas, das ações gráficas que seriam realizadas). Por outro lado, uma vez pronto o algoritmo, a perspectiva de conseguir diferentes formas com a simples gradação suave dos *sliders*, presentes em suas programações previamente concebidas, agradou aos participantes.

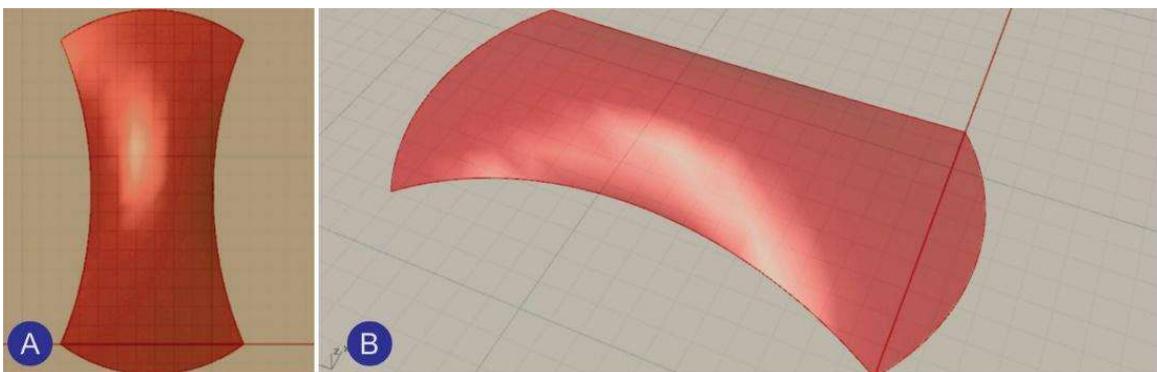
Figura 93: Algoritmo responsável pela forma produzida



Fonte: Autor, 2019

Alguns participantes não eram familiarizados com alguns conceitos que foram implementados no algoritmo deste processo projetivo, como notou-se no procedimento *flatten* utilizado para reduzir uma árvore de informação de múltiplos caminhos em um único. Neste caso específico reduziram-se as informações de três caminhos diferentes, um para cada curva, em uma informação única capaz de ser introduzida no plugue (encaixe algoritmo) que iria auxiliar a montagem da superfície final (figura 94A e B).

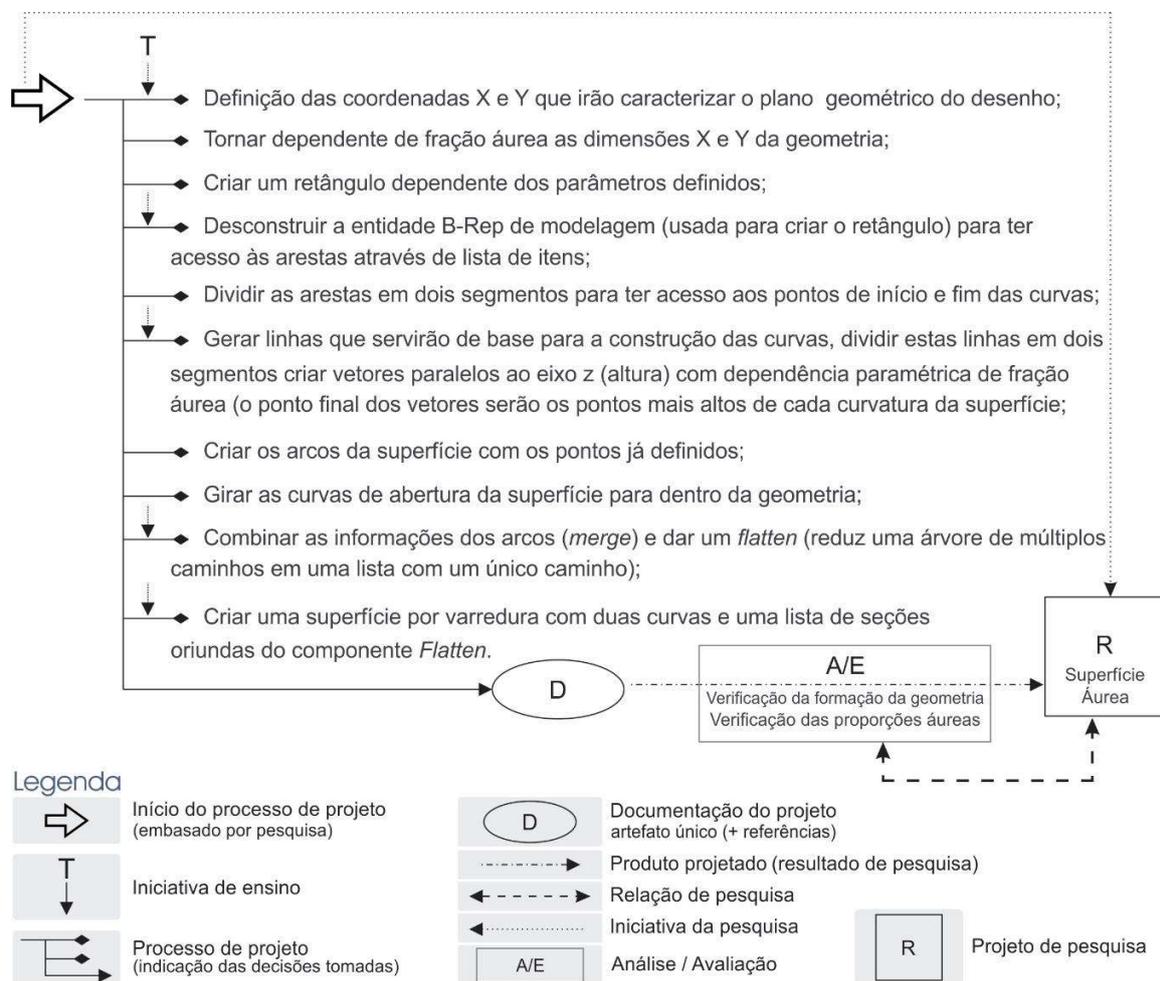
Figura 94: Forma final produzida por algoritmo



Fonte: Autor, 2019

Observou-se que esta metodologia projetiva (figura 95) necessita de mais fases processuais que o modelo geométrico com precisão através de mouse, entretanto, como os procedimentos envolvidos precisam necessariamente serem explícitos para que possam ser inseridos no computador por AAD, o próprio algoritmo facilita o processo de pesquisa, visto que o fluxo de procedimentos já é documentado graficamente pelo mesmo algoritmo, que por sua vez é a documentação dos procedimentos do ato projetivo.

Figura 95: Fluxograma do processo de projeto de precisão por AAD



Fonte: Autor, 2019

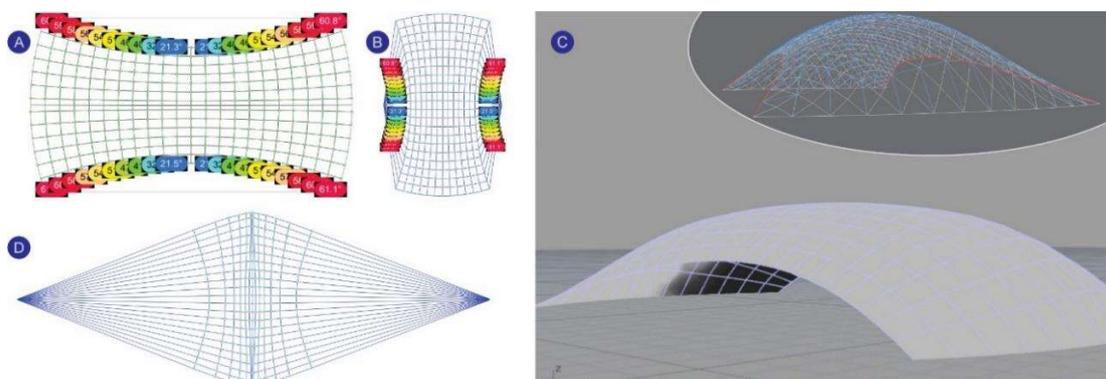
O último modelo explorado pelos participantes foi o de formação baseada em desempenho. Nesta investigação foram utilizados o software *Rhinoceros* e o *plug-in RhinoVault*. A forma final deste processo digital não foi originada pela vontade do projetista, mas sim pela melhor resposta às condições físicas que foram simuladas pelo modelo que trabalha com *form-finding*.

O processo de projeto se iniciou pela construção da base áurea da superfície no *Rhinoceros*, depois de reconstruir a malha utilizando 3 unidades de pontos de controle nas direções 'u' e 'v'. Após isso, escalou-se a mesma nos eixos 'x' e 'z' de maneira a adquirir as proporções áureas (os pontos de controle serviram para distorcer a malha inicial).

Com o *RhinoVault* iniciado, selecionou-se a malha para criar o diagrama de forma e a opção de modificação da distância entre as isolinhas da superfície que iriam compor este diagrama (o valor normal é 0,75 e foi também o utilizado). Após selecionar as arestas que serviram como abertura (entradas da superfície), o programa calculou o diagrama de forma e posteriormente o gráfico duplo (forma e força) conforme pode ser visto nas figuras 96A (forma) e 96B (força).

Estes gráficos servem para identificar o ângulo que as forças irão percorrer ao longo da superfície simulada (ainda bidimensional), gráficos estes nos quais os pontos coloridos (figuras 96A e B) representam os nós que estão em desequilíbrio. Ressalta-se que quanto menor for a distância entre as isolinhas do diagrama de forma, melhor será a análise de elementos finitos quanto a distribuição de tensões na malha da superfície, entretanto uma malha muito refinada exige mais tempo de processamento.

Figura 96: Exploração formal por emulador físico



Fonte: Autor, 2019

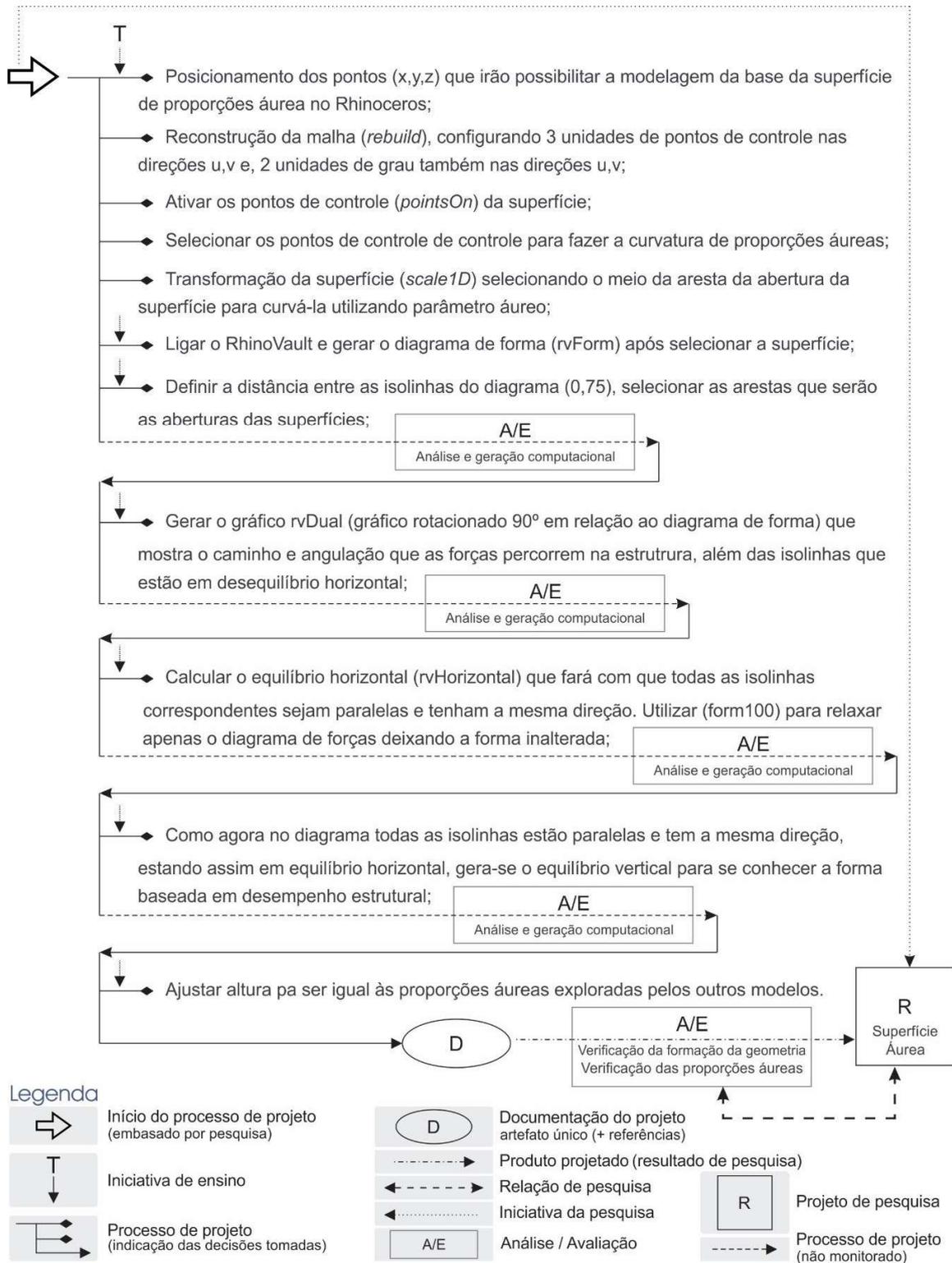
Como exemplo deste incremento no tempo de processamento, podemos citar o próprio *RhinoVault*, que quando solicitado a fazer um cálculo que demande maior tempo apresenta a frase: “é melhor pegar um café, isto pode demorar um pouco” (tal intervenção pode ser caracterizado como mais um aspecto de sua interface amigável).

Dando seguimento à metodologia projetiva, o programa então calculou o equilíbrio horizontal da estrutura (processo que necessitou de ser repetido diversas vezes, visto que há opção modificação de porcentagem da forma para que se ajuste ao gosto do usuário, de maneira que há diversas combinações possíveis).

Neste exercício, encontrou-se o equilíbrio horizontal com apenas uma interação (form100). Com esta simulação condicionada, o programa alterou a distribuição de forças do diagrama (figura 96D), deixando o diagrama de forma inalterado, quando possível (lembrando que por se tratar de um processo de *form finding*, é esperado um mínimo de alteração para melhor atender o escoamento das forças estrutura).

A morfologia resultante do cálculo do equilíbrio vertical feito pelo computador é apresentada na figura 96C e o fluxograma do processo de projeto baseado em desempenho pode ser verificado na figura 97.

Figura 97: Fluxograma do processo de projeto de formação por desempenho

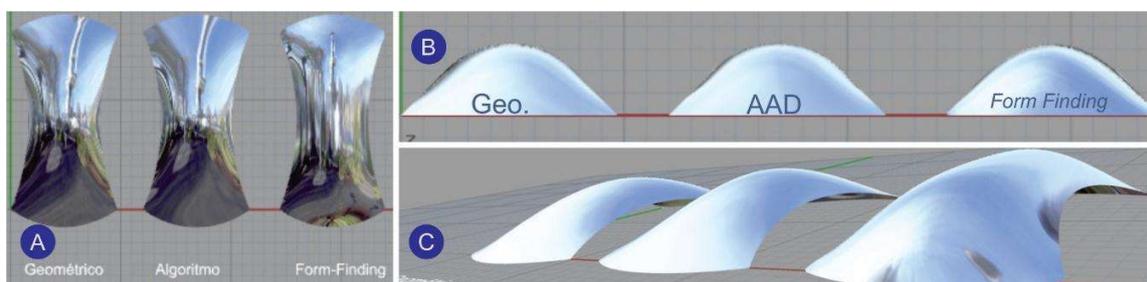


Fonte: Autor, 2019

Após finalizar os três processos projetivos e comparar os resultados formais, nota-se que a geometria produzida por AAD por trabalhar com fator multiplicador matemático áureo de maior precisão possibilitou uma forma com dimensões ligeiramente maiores que as outras duas. Para solucionar esta problemática e garantir que os processos utilizassem a mesma precisão na variável de controle (base geométrica com proporções áureas), os modelos geométrico e de formação baseada em desempenho foram refeitos com precisão de 6 casas decimais no número áureo.

Ressalta-se que para acelerar o desenvolvimento dos processos de projeto poderia ser utilizado uma única base inicial áurea desenvolvida por AAD (isso teria garantido a precisão matemática), entretanto, como a metodologia *Design Research* trabalha com a descrição dos fluxos metodológicos, na pesquisa achou-se interessante demonstrar todos os procedimentos de cada modelo, diferenciando-os inclusive nesta fase inicial.

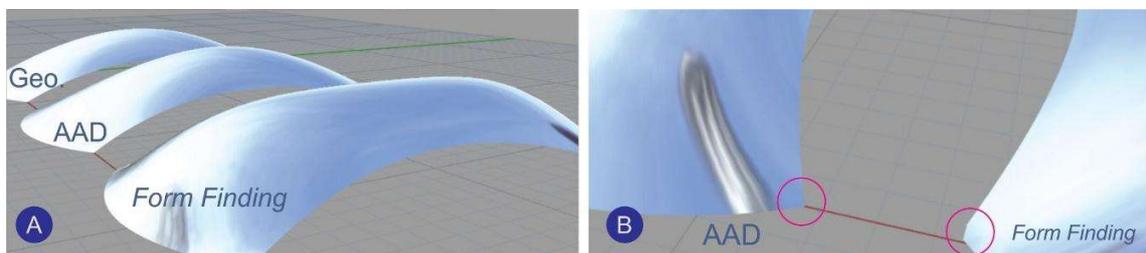
Figura 98: Comparação visual dos três modelos estudados



Fonte: Autor, 2019

Uma vez resolvida essa falta de equivalência decimal, foi possível perceber (figuras 98A e B) que embora os três modelos fossem visualmente semelhantes, haviam diferenças (figura 98C) em relação à geometria e ao desempenho estrutural da forma, como por exemplo o fato de que o modelo de *form finding* (formação baseada em desempenho) arredonda os cantos da superfície, justamente por estes serem pontos de concentração de carga, podendo dificultar o escoamento das mesmas conforme figura 99B.

Figura 99: Diferenças geométricas nos modelos



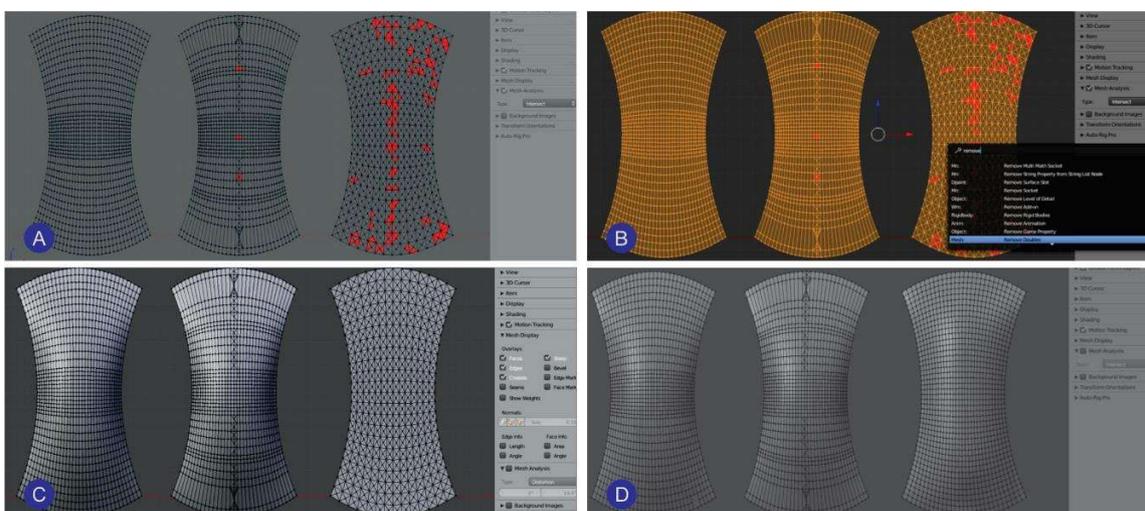
Fonte: Autor, 2019

Nota-se, ao observar a figura (99A), que enquanto os dois primeiros modelos (geométrico e algorítmico) possuem uma única curvatura máxima, o modelo de formação baseada em desempenho possui duas (próximas às arestas que tocam o solo), apresentando uma ligeira concavidade no topo da geometria da superfície, esta alteração geométrica é fruto do processo digital de *form-finding* (mesmo utilizando o 'form100' para modificar o mínimo possível sua forma). Esta resposta já era prevista, uma vez que o processo de projeto digitalmente mediado pelo *RhinoVault* favorece o escoamento das tensões atuantes e não a intenção projetual do arquiteto.

No tangente à análise da resposta geométrica de modelagem, os dois primeiros processos de projeto geraram uma superfície como entidade de saída de modelagem. O processo de *form-finding*, por sua vez, desenvolvido através do *RhinoVault* modelou a geometria por intermédio de malha poligonal. Os três resultados foram então exportados como objeto 3D (.obj) para o software Blender, para que fosse possível analisar a duplicidade de elementos constituintes das malhas de cada geometria, conforme demonstra a figura 100.

É preciso apontar que, para melhor compreensão da análise, a disposição dos modelos sempre segue a ordem, da esquerda para a direita: processo geométrico com precisão através de mouse computacional, processo AAD e processo de formação baseada em desempenho.

Figura 100: Análise da composição e subdivisão das malhas das geometrias



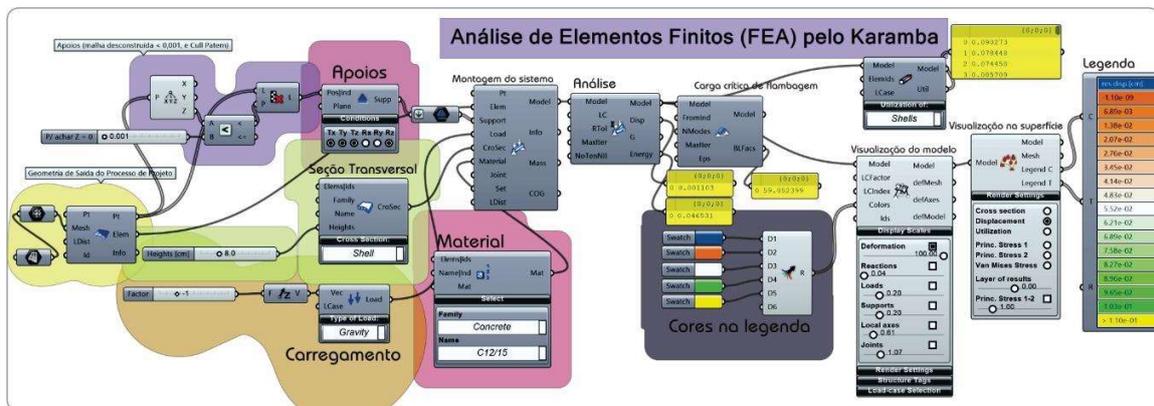
Fonte: Autor, 2019

A geometria produzida pelo *form-finding* do *RhinoVault* apresentou (figura 100A) diversos vértices e/ou faces sobrepostas em intersecção, isto ocorreu em diversas localidades desta superfície. Não obstante, a malha do processo algorítmico também possuía alguns pontos sobrepostos, que se localizavam exatamente na curvatura máxima da superfície. Ressalta-se que esta curvatura da parte mais elevada também gerou uma malha triangular neste trecho, diferenciando-se do processo de projeto geométrico que não possuía essa triangulação e não apresentou nenhuma sobreposição de elementos.

Para limpar estas malhas procedeu-se à edição das mesmas e aplicação do recurso de remoção de primitivas duplicadas através do Blender (figura 100B). As três malhas após o procedimento podem ser observadas na figura 100C. Por fim, as mesmas foram modificadas para que tivessem a mesma distribuição quadrada, conforme figura 100D.

As análises de elementos finitos (FEA) dos modelos foram realizadas através do *plugin Karamba* cujo algoritmo responsável pode ser observado na figura 101.

Figura 101: Algoritmo responsável pela análise de elementos finitos no Karamba



Fonte: Autor, 2019

Com o Karamba foi possível configurar os tipos de apoios, carregamentos (neste estudo utilizou-se apenas a gravidade) e o tipo de seção da estrutura (casca). Uma ressalva importante de ser realizada é que, para esta análise, configurou-se o tipo de material como sendo concreto, pois na pesquisa não havia dados relativos à caracterização física do material compósito empregado e, deste modo, ao utilizar o concreto em todos os modelos foi possível aferir como as formas gerada pelos três processos possuíam desempenhos diferentes. Dentre as opções de concreto existentes no programa utilizou-se o tipo C12/15 (classe de resistência) com 8 cm de espessura.

O manual do Karamba explica que, em uma análise por meio da teoria dos elementos de primeira ordem, o programa calcula a deformação para cada caso de carga, assumindo que a influência das forças axiais (que acontecem no sentido do plano da superfície) é insignificante. Na teoria dos elementos de segunda ordem (utilizado na análise desta fase experimental), por sua vez, a força axial no plano da casca exerce influência na rigidez estrutural, haja vista que por se tratar de uma estrutura de superfície ativa as forças de compressão diminuem a rigidez enquanto as de tração auxiliam no aumento dela.

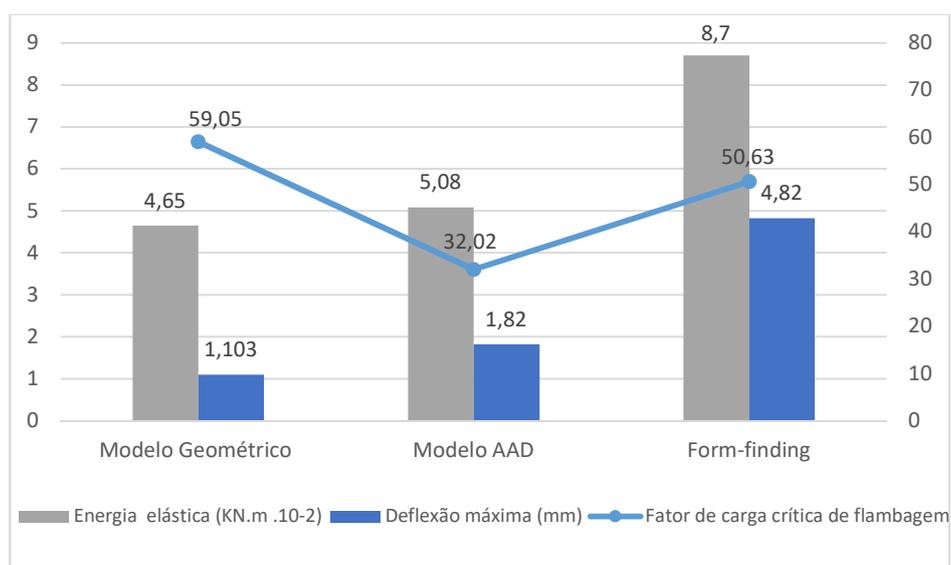
A análise dos elementos de segunda ordem permite que a influência das forças de compressão nos deslocamentos e nas forças de seção transversal não sejam negligenciadas

durante o cálculo (a literatura chama de pequenos deslocamentos), o que aconteceria se o valor absoluto fosse menor do que 10% da carga de flambagem.

Deste modo, os valores de deformação máxima (mm) e energia interna de deformação ( $\text{KN.m.10}^{-2}$ ) podem ser utilizados para aferir a eficiência estrutural dos modelos, visto que quanto menores forem as deflexões máximas menor será sua energia interna de deformação elástica<sup>104</sup> e consequentemente este modelo necessitará de uma menor quantidade de material para ser fabricado.

Quando se analisa a figura 102 se nota que a superfície gerada pelo processo de projeto de formação baseada em desempenho apresentava os piores resultados quando comparado com as superfícies geradas por modelo geométrico e modelo AAD.

Figura 102: Energia elástica x deformação máxima x fator de carga crítica



Fonte: Autor, 2019

<sup>104</sup> A energia elástica ou energia interna de deformação elástica é o resultado da força vezes o deslocamento paralelo a esta força. Em termos práticos quando se estica um material no regime elástico, a força inicial é zero e cresce proporcionalmente à rigidez e ao aumento do comprimento do material. Em um caso hipotético onde existam forças finais iguais, a energia elástica armazenada em um material diminui com a diminuição de seus deslocamentos, correspondendo à um aumento de rigidez.

Esse resultado levou a uma reinterpretação do processo de projeto de *form-finding* onde foi possível perceber que no momento em que se determinou o uso do form100<sup>105</sup> para calcular o equilíbrio horizontal (rvHorizontal) da estrutura, o processo de projeto forçou um pensamento convencional dentro de uma metodologia digital de projeto (tentou-se forçar o programa a chegar na forma desejada ao invés de deixa-lo investigar a melhor solução).

Em síntese, na pesquisa foi dada ao computador o comando de que encontrasse a melhor resposta formal dentro da ideia de forma prevista (as dos modelos AAD e geométrico). Assim, utilizava-se, ainda que inconscientemente, um pensamento *form-making* dentro de um processo de *form-finding*: dois modelos inerentemente distintos.

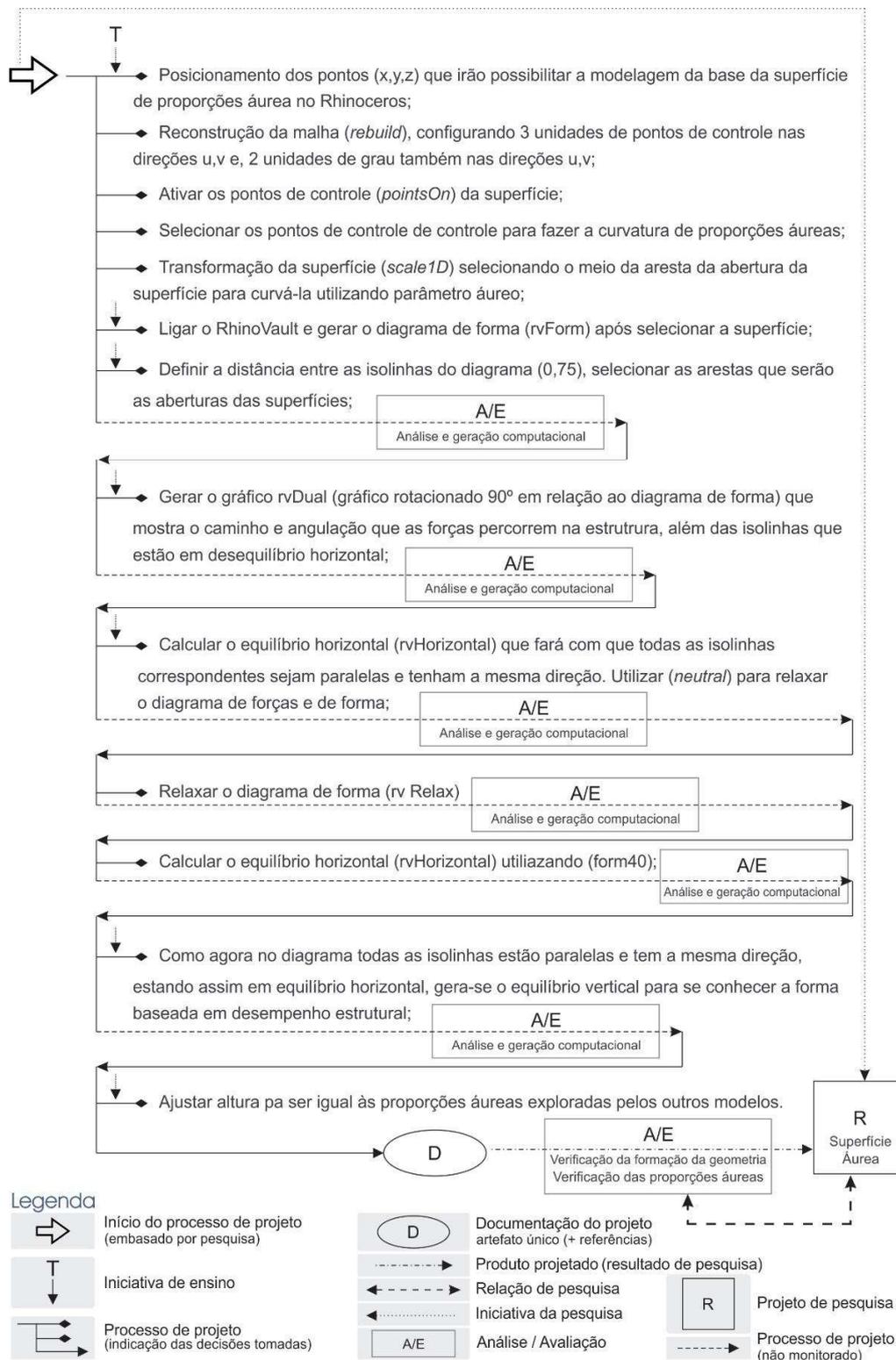
Importante ressaltar que mesmo não sendo o foco desta investigação, com esta descoberta foi possível notar indícios de que nas primeiras utilizações de um processo de projeto novo o projetista pode tentar reproduzir raciocínios utilizados pelos processos até então utilizados, sem aproveitar as possibilidades que podem existir no novo processo. Este pensamento vai de encontro à tese de Larena (2007) já discutida no capítulo 4.

Para solucionar esta problemática, a superfície originada pelo processo de projeto baseado em desempenho foi refeita, desta vez permitindo que o computador efetivamente encontrasse a melhor resposta formal para as condicionantes utilizadas. O novo fluxograma do processo de projeto é apresentado na figura 103.

---

<sup>105</sup> Como já descrito, ao selecionar o form100 no cálculo de equilíbrio horizontal, o programa vai variar a distribuição de força e manter a forma, à medida do possível, inalterada.

Figura 103: Fluxograma do processo de projeto de *form-finding*

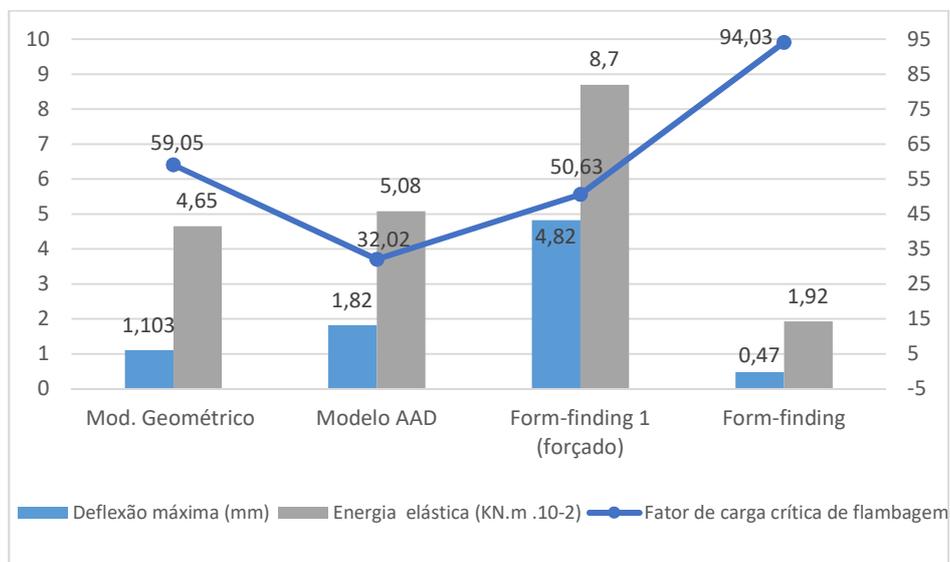


Fonte: Autor, 2019

Os modelos investigados foram colocados lado a lado para aferição das características das superfícies produzidas. Foi feita a opção por deixar o modelo erroneamente produzido como estava para compará-lo com o correto. Isto posto, o processo de projeto de formação originado com raciocínio equivocado foi chamado de *form-finding1* (forçado) e o modelo corrigido foi nomeado de *form-finding*, conforme figura 104.

Como o fator de carga crítica de flambagem consiste no número pelo qual o carregamento de uma estrutura hipotética teria que ser multiplicado para que a mesma fosse considerada instável, é possível notar (figura 104) que o modelo *form-finding* apresentou um fator de multiplicação de 90,04, frente aos valores de 59,05 e 32,02 dos modelos geométrico e AAD respectivamente.

Figura 104: Energia elástica x deformação máxima x fator de carga crítica

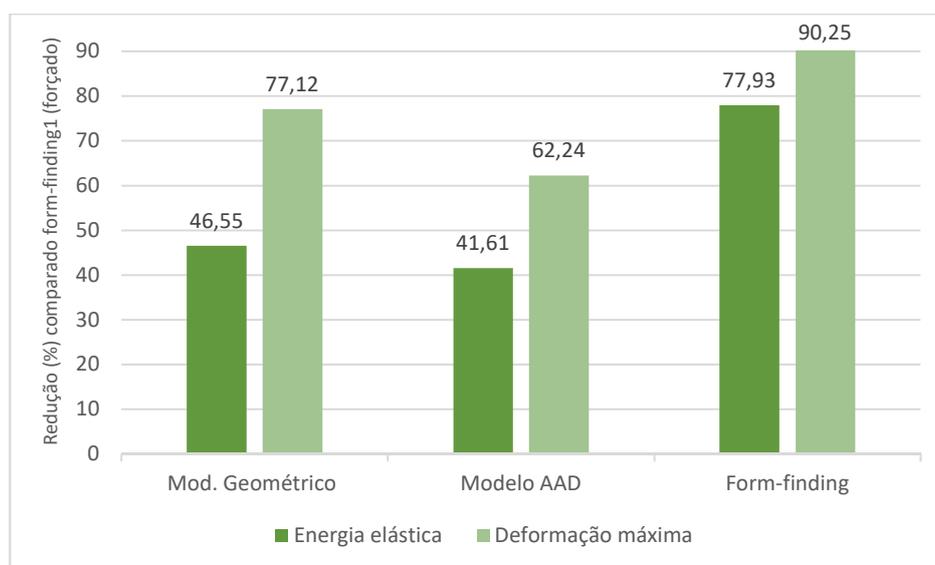


Fonte: Autor, 2019

Ao utilizar os valores encontrados no modelo *form-finding1* (forçado) como referência (piores resultados) é possível demonstrar a redução, em porcentagem, da

energia elástica e deformação máxima das superfícies analisadas, conforme demonstra a figura 105.

Figura 105: Redução nos valores de deformação máxima e energia elástica

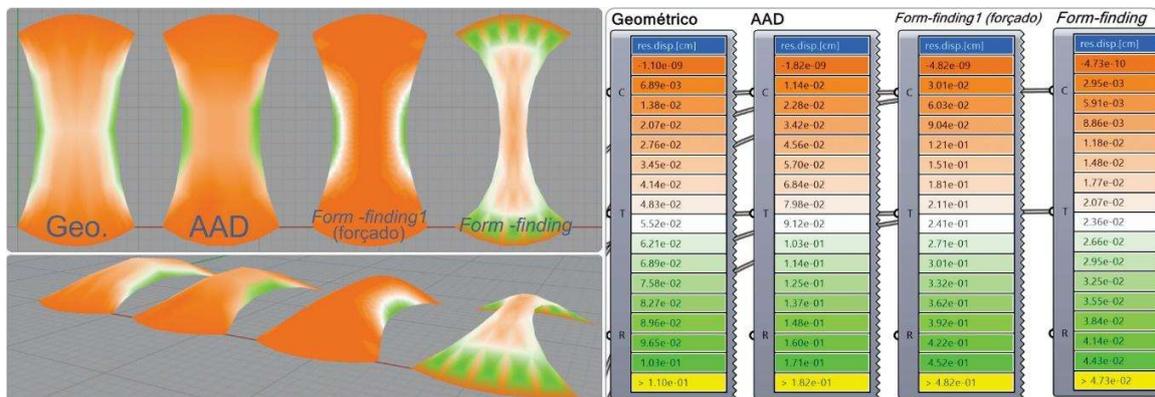


Fonte: Autor, 2019

Nota-se (figura 104) que o modelo *form-finding* apresentou os melhores resultados, configurando-se uma superfície otimizada que, quando comparada com as outras, necessitaria menos material para ser fabricada, visto que possui menores valores de deformação máxima e energia elástica.

Para compreender visualmente a disposição dos dados apresentados nas análises posteriores, apresenta-se a figura 106 com os modelos investigados (geométrico, AAD, *form-finding1*(forçado) e *form-finding*), já com a análise das deformações ocorridas. Ressalta-se que a nova estrutura *form-finding* é apresentada também nesta figura no canto direito. Agora, com o processo de formação baseada em desempenho efetivamente realizado, é possível notar que a forma encontrada é significativamente diferente dos modelos anteriores, como esperado.

Figura 106: Análise dos deslocamentos das superfícies



Fonte: Autor, 2019

Ao observar as superfícies simuladas pelo Karamba (figura 106), foi possível perceber que as maiores deformações ocorrem nas aberturas das superfícies, com a maior deflexão sendo apresentada pelo modelo *form-finding1* (forçado) de 4,5 mm; seguido dos valores 1,71; 1,03; e 0,17, para os modelos AAD, geométrico e *form-finding* respectivamente. Ressalta-se que a deformação nos apoios foi praticamente nula.

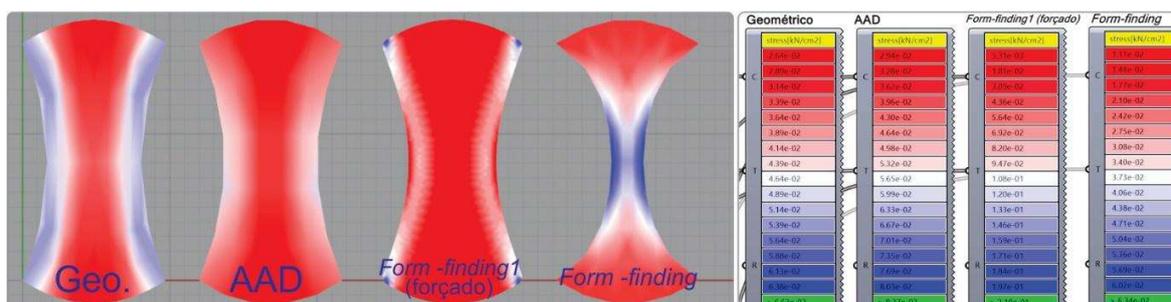
Na teoria de Von Mises um elemento estrutural dúctil irá falhar quando a energia de distorção de um elemento (energia necessária para que ocorra a mudança na forma de um corpo) submetido à um carregamento multiaxial, ultrapassar a energia de distorção de um corpo de prova submetido a tração uniaxial. Deste modo, nestes materiais a deformação residual (escoamento) irá ocorrer no local onde a tensão Von Mises (figura 107) for igual ao limite de escoamento<sup>106</sup>. Portanto, a tensão Von Mises consegue determinar tensão crítica no material a partir dos valores da tensão máxima e mínima

Isto posto, observa-se na figura 107 que o modelo geométrico apresentou tensões de  $3,39 \times 10^{-2}$  KN/cm<sup>2</sup> na curvatura máxima da superfície e  $5,14 \times 10^{-2}$  KN/cm<sup>2</sup> na abertura da mesma. A geometria produzida por AAD obteve  $3,623,39 \times 10^{-2}$  KN/cm<sup>2</sup> na curvatura

<sup>106</sup> A tensão de escoamento é a tensão máxima que o material suporta, dentro do regime elástico de deformação, neste caso quando as forças deixam de ser aplicadas, o material não sofre deformação residual.

máxima e  $5,65 \times 10^{-2}$  KN/cm<sup>2</sup> na abertura. Já o modelo de *form-finding* apresentou respectivamente 4,38 e  $6,02 \times 10^{-2}$  KN/cm<sup>2</sup> para curvatura máxima e abertura.

Figura 107: Análise da tensão Von Mises nas superfícies



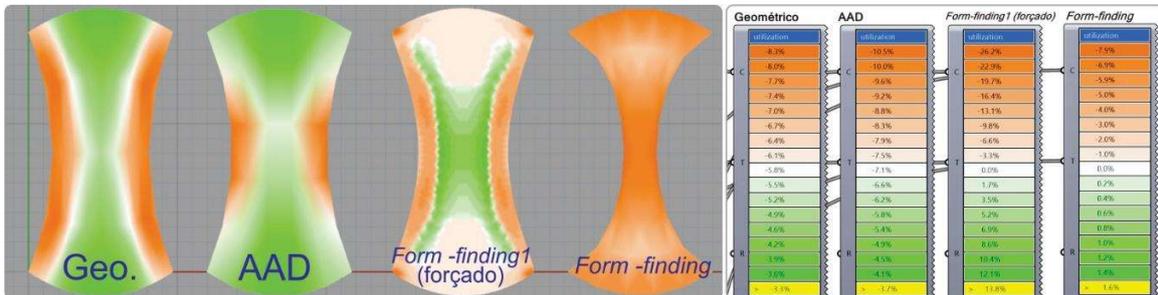
Fonte: Autor, 2019

No que tange a análise de utilização da estrutura, faz-se necessário ter em mente sua definição (razão entre a tensão de escoamento e a tensão Von Mises (figura 108)), sendo assim possível aferir o quanto um material hipotético é solicitado, em porcentagem, a partir do que ele teoricamente resiste.

Existem, porém, algumas ressalvas que devem ser realizadas. Uma delas é que não pode, necessariamente, existir uma estrutura otimizada com 100% de utilização, pois muitas vezes entram critérios de serviços que impedem os deslocamentos máximos. Outra ressalva a se notar é de que podem existir estruturas projetadas com grandes dimensões e, portanto, a deformação será o resultado mais relevante da análise, e não a utilização.

Para analisar a utilização, por sua vez, ressalta-se que valores positivos fazem referência a esforços de tração e valores negativos relacionam-se à compressão. Isto posto, é possível notar (figura 108) que a superfície oriunda da formação baseada em desempenho (*form-finding*) obteve o resultado mais homogêneo apresentando o valor aproximado de 7% de utilização para esforços de compressão, frente à uma variação de 4,2 a 8,3% para o modelo geométrico e 4,1 a 10,5% para o AAD (todos em compressão apenas).

Figura 108: Análise da utilização nas superfícies

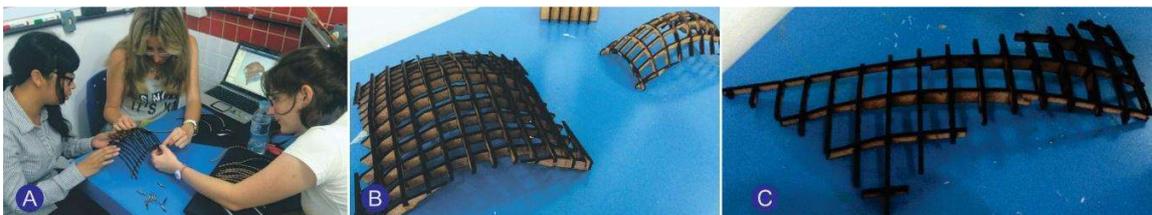


Fonte: Autor, 2019

O modelo de form-finding1 (forçado) foi o único que apresentou utilização com esforços de compressão e tração ao mesmo tempo, isso se deve em função da geometria por ele formada, que possuía concavidade e convexidade, como já apontado na análise visual das superfícies. Os valores encontrados neste modelo foram de 0 próximo aos apoios, 10,4% (tração) no meio da superfície e 13,1% (compressão) nas aberturas. Uma última ressalva deste modelo é que ele foi o único com concentração de tensões no canto apresentando uma utilização de aproximadamente 26,2% (compressão), conforme figura 108.

No fim do primeiro dia de curso, cada participante pôde escolher qual modelo gostaria de utilizar para gerar uma superfície curva (formadas, ou não, por influência de forças físicas). Depois de geradas, as superfícies tridimensionais foram convertidas em lâminas 2D através do aplicativo 123D *maker*, para então serem fabricadas por meio de cortadora *laser* (figuras 109A), e montadas, como demonstram as figuras 109B e C.

Figura 109: Fabricação digital de superfícies



Fonte: Autor, 2019

No segundo dia foram apresentados aos participantes os materiais compósitos de alto desempenho mecânico, além das técnicas de fabricação. Neste momento foi possível manusear exemplos previamente construídos (com diferentes fibras e resinas), e os participantes puderam conhecer e discutir as aplicações no campo das indústrias aeronáuticas, naval, automobilística e AECO.

Para demonstrar a aplicabilidade desses materiais na arquitetura e, principalmente, para verificar as dificuldades de fabricação que poderiam ser encontradas pelos participantes, que não possuíam treinamento na área, foi proposta a produção *in loco* de duas superfícies em escala reduzida.

Os moldes utilizados foram previamente fabricados na Laboratório de Modelos e Maquetes da FAU USP e eram oriundos de processo digital de projeto de formação baseada em desempenho, que utilizou o Rhinoceros e *plug-in* RhinoVault para encontrar a forma ótima em relação ao equilíbrio das tensões nas superfícies. A execução do protótipo foi feita por Comando Numérico Computadorizado – CNC, como demonstra a figura 8A e B. Nesta fase foi necessário, primeiramente, colar (com adesivo de aspensão) a peça de Poliuretano expandido na base da *Router* CNC (previamente limpa), conforme figura 110A.

Figura 110: Fabricação dos moldes

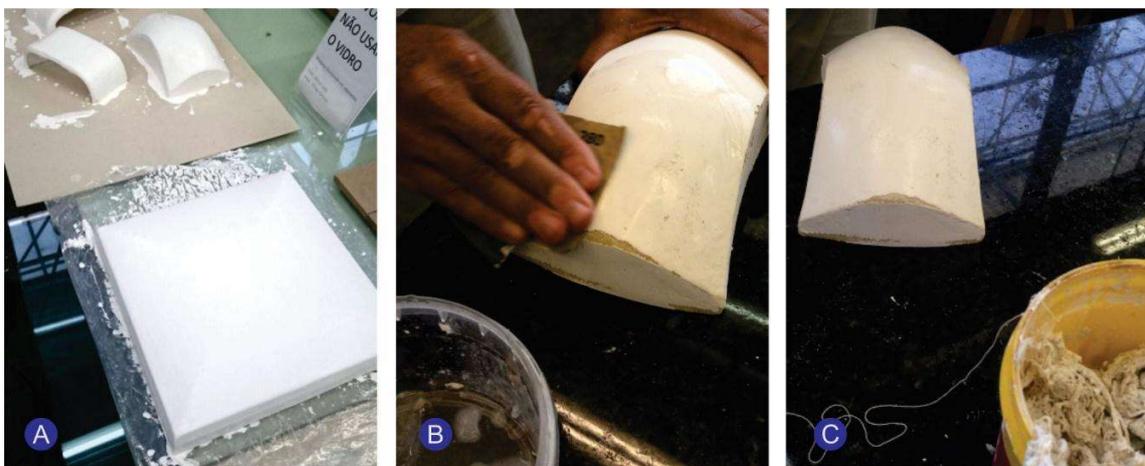


Fonte: Autor, 2019

Depois da usinagem do molde (figura 110B) foram aplicadas três demãos de Gel Coat da marca Wanda, para evitar que a resina entrasse em contato com o molde e selar os poros do material. A aplicação foi feita com pincel (figura 107C) e a proporção utilizada foi de 200 ml de Gel e 35 gotas (1,4%) de catalizador Butanox.

Com o molde seco (figura 111A), procedeu-se ao nivelamento das superfícies para diminuir a rugosidade com auxílio de lixas d'água de 200 a 1500 (figura 111B). Após esta etapa, lavaram-se os moldes com água e sabão para retirar qualquer sujeira. Depois que os moldes estavam enxutos, procedeu-se a aplicação de polimento com duas demãos de massa de polir número 2 da marca Pérola. Entre cada polimento, esperou-se 10 minutos para secagem, conforme figura 111C. Por fim, aplicaram-se três demãos de polimento com cera da marca Tec Glaze.

Figura 111: Procedimentos para diminuir a rugosidade do molde



Fonte: Autor, 2019

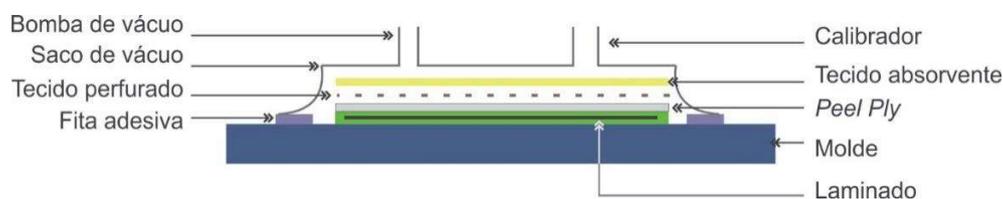
As etapas realizadas foram previamente explicadas aos participantes, vez que a fabricação de superfícies com materiais compósitos neste minicurso iniciava-se com os moldes já prontos (em virtude do tempo escasso).

Isto posto, foram mostradas neste dia as características inerentes aos processos de fabricação por compósitos, conforme apontamentos de Gibson (1994), que afirmou que os

compósitos laminados, como é o caso da presente pesquisa, são produzidos pela laminação de diferentes camadas, de distintos materiais (como fibra e manta de vidro, resinas, etc). Esta combinação produz um compósito cujas características (física, química, acústica, termodinâmica etc) são melhoradas/ajustadas de acordo com a expectativa gerada pela aplicação dos constituintes.

No minicurso em questão, optou-se pela utilização do método de laminação por saco de vácuo, e assim, para que os participantes pudessem compreender o que seria realizado, apresentou-se a definição de Abreu (2011) que afirmou que o processo consiste em banhar as fibras de reforço escolhidas (vidro, amianto, carbono etc) com resina polimérica sobre um molde, onde, após ser selado em um saco, aplicar-se-ia o vácuo. O esquema do processo de saco a vácuo que foi apresentado aos participantes pode ser visualizado na figura 112.

Figura 112: Esquema representativo do processo de laminação a vácuo



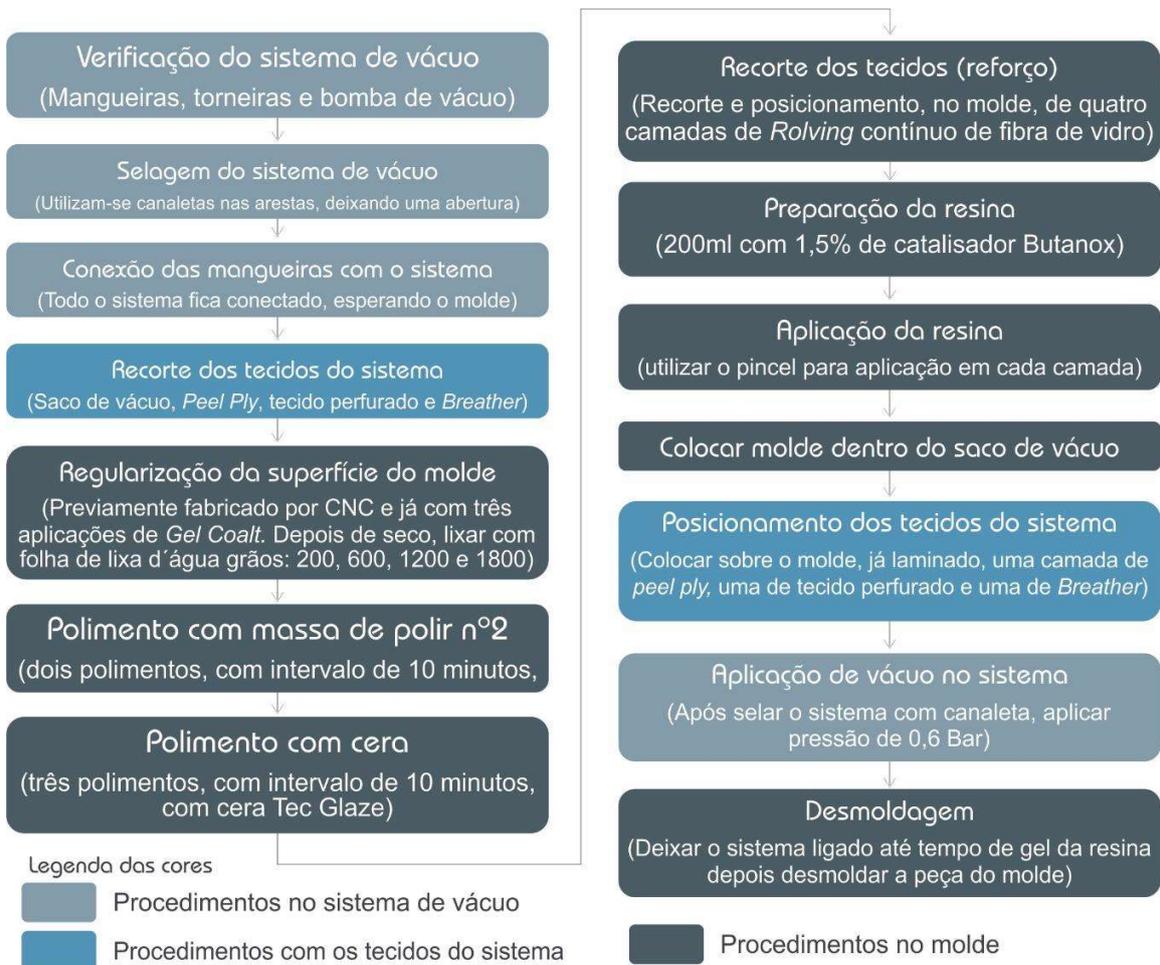
Fonte: Lopes, 2009

Neste processo é possível alcançar teores de reforço entre 60 e 70%, frente 40 a 30% de resina no sistema. Um processo de laminação manual apresenta valores inversos, com isso os participantes puderam compreender a eficácia de tal tecnologia. A vantagem na utilização deste processo, é que o mesmo gera um ambiente de trabalho limpo, além de possuir reduzido tempo de fabricação quando comparado com sistemas convencionais como alvenaria, por exemplo. Vale ressaltar ainda que o tempo de produção pode ser ajustado com aditivos às resinas, que diminuam o tempo de polimerização das mesmas.

Apresentadas as definições, os presentes optaram pela utilização de fibra de vidro e duas resinas: poliéster em um molde, e epóxi no outro. Os fluxos de procedimentos de

fabricação por materiais compósitos, previamente estabelecidos, foram informados aos participantes e podem ser conferidos na figura 113.

Figura 113: Fluxos de procedimentos de fabricação previamente definidos



Fonte: Autor, 2019

O processo de laminação iniciou-se com o recorte (nas dimensões dos moldes) de 4 camadas de manta de fibra de vidro. Em seguida aplicou-se resina poliéster (figura 114A) com 1,5% de catalisador Butanox; após este procedimento colocou-se a peça no saco de

vácuo (figura 114B). O protótipo foi deixado sob pressão de 0,6 bar<sup>107</sup> até a catalisação (15 minutos) da resina (figura 114C), a outra superfície foi fabricada com o mesmo processo de fabricação e resina epóxi.

Figura 114: Fabricação por laminação manual e saco de vácuo.



Fonte: Autor, 2019

Esta foi a segunda abordagem laboratorial da presente pesquisa no que tange à fabricação por materiais compósitos, visto que a primeira foi feita no curso da ALMACO. Uma vez que os próprios facilitadores também estavam desenvolvendo e aperfeiçoando os processos, realizou-se um diálogo com os participantes para que os mesmos pudessem relatar as dificuldades encontradas e pontos que requeriam atenção.

Neste sentido, foi ressaltado que a bomba aplicava pressão de vácuo superior ao necessário para a fabricação da peça (0,6 bar) o que ocasionou a retirada de monômeros de estireno do sistema (além da possibilidade de sobrecarga da bomba na tentativa de controlar a pressão). Este fato resultou em uma peça com pouco teor de resina (no molde que utilizou resina poliéster), na qual a fibra de vidro era passível de ser visualizada (figura 115A). À título de comparação quando há uma cura correta do compósito a fibra de vidro forma um novo material com a resina, por vezes ocasionando translucidez.

---

<sup>107</sup> Utiliza-se a pressão máxima de 0,6 bar para que não sejam retirados os monômeros de estireno do compósito, fato este que ocorreria em pressões superiores à supracitada.

Figura 115: Peças prontas após fabricação.



Fonte: Autor, 2019

A superfície que utilizou resina epóxi (figura 115B) também teve sua cura prejudicada, entretanto, apresentou uma melhor consistência que a produzida com resina poliéster. Ressalta-se que o compósito com resina epóxi ficou maleável e instável (característica também indesejada), conforme figura 115C.

Outro ponto negativo, foi que na tentativa de simplificar as etapas de fabricação, foram aplicados apenas Gel Coat, além de polimentos com massa de polir nº2 e cera Tec Glaze, acreditando que estas etapas bastariam para garantir a desmoldagem. Tal fato não ocorreu, pois ambas as superfícies ficaram aderidas ao molde (por não estarem quimicamente isolados), conforme figura 116. Devido à força necessária para retirar a peça do molde houve descolamento entre fibra e matriz polimérica (figura 116B).

Figura 116: Peças prontas após fabricação.



Fonte: Autor, 2019

O minicurso possibilitou aplicação da metodologia de fabricação, além de viabilizar a percepção de que, uma vez solucionadas as variáveis negativas supracitadas, seria

possível utilizar o fluxo de procedimentos com mão de obra não especializada (que nesta investigação foram os participantes) para a fabricação por laminação manual e saco de vácuo de geometrias não convencionais oriundas de processos de projeto.

Por fim, esta experiência demonstrou a necessidade de diminuir as variáveis estudadas (forma e fabricação), isto porque o processo laminação manual com saco de vácuo ainda não era dominado na presente pesquisa. Para solucionar esta deficiência, foi feito um curso de moldes na ALMACO focado na resolução de dúvidas e problemas referentes ao processo de fabricação, principalmente em relação à desmoldagem com auxílio de aplicação de poli(álcool vinílico) – PVA. Em relação à sobrecarga da bomba de vácuo, foram instaladas válvulas que controlavam a entrada e saída de ar do sistema.

## **6.2. Refinamento do processo de fabricação**

Para verificar se os problemas encontrados no processo de fabricação haviam sido solucionados, na pesquisa se propôs um estudo que culminou em uma publicação no Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), em 2016. Nesta investigação buscou-se analisar, comparativamente, propriedades físicas que pudessem interferir no desempenho lumínico e térmico de dois materiais poliméricos empregados nos sistemas de iluminação zenital: Poli(metil metacrilato), de sigla PMMA, e Polímero Reforçado com Fibra de vidro, do inglês *Glassfiber Reinforced Polymer* (GRP). Neste sentido, foram aferidas emissividade, iluminância, temperatura superficial, e fluxo de calor radiante.

A escolha do PMMA se deu em razão de este ser um dos materiais comumente usados para a fabricação de domos no Brasil. O GRP, por sua vez, foi selecionado pelo fato de ser um material fibroso que, via de regra, apresenta boa resistência a impactos (diferente do PMMA). Um modelo reduzido de domo de acrílico leitoso<sup>108</sup>, que fora utilizado para validação de um método de instalação no edifício da FAU USP, serviu como molde para

---

<sup>108</sup> A referência exata da cor é CASTCRIL: CZ 1405.

superfície GRP, e com isto se garantiu que a variável da forma fosse controlada e, assim, fossem testados o processo de fabricação e as propriedades analisadas neste estudo.

Antes da laminação aplicou-se uma camada de massa de polir número 2 de marca Pérola (figura 117A). Após aplicação da mesma, foi deixado a secar, e depois polido com uma estopa (figura 117B). Depois deste polimento, que tem a finalidade de retirar todas as sujeiras do molde, é preciso lavar o molde com água e detergente para desengordurar, para finalizar esta etapa o molde foi seco com auxílio de ar comprimido.

Figura 117: Preparação do molde de PMMA.



Fonte: Autor, 2019

Após o processo descrito, efetuaram-se três enceramentos, com aplicação de cera Tec Glaze, com tempo de secagem entre eles de 15 minutos, depois procedeu-se ao polimento (figura 117C). O último polimento foi feito com mais intensidade, para retirar todo o excesso de cera, visto que, caso ficasse algum resíduo era possível que houvesse

craquelamento do desmoldante poli(álcool vinílico) - PVA, comprometendo assim a camada selante.

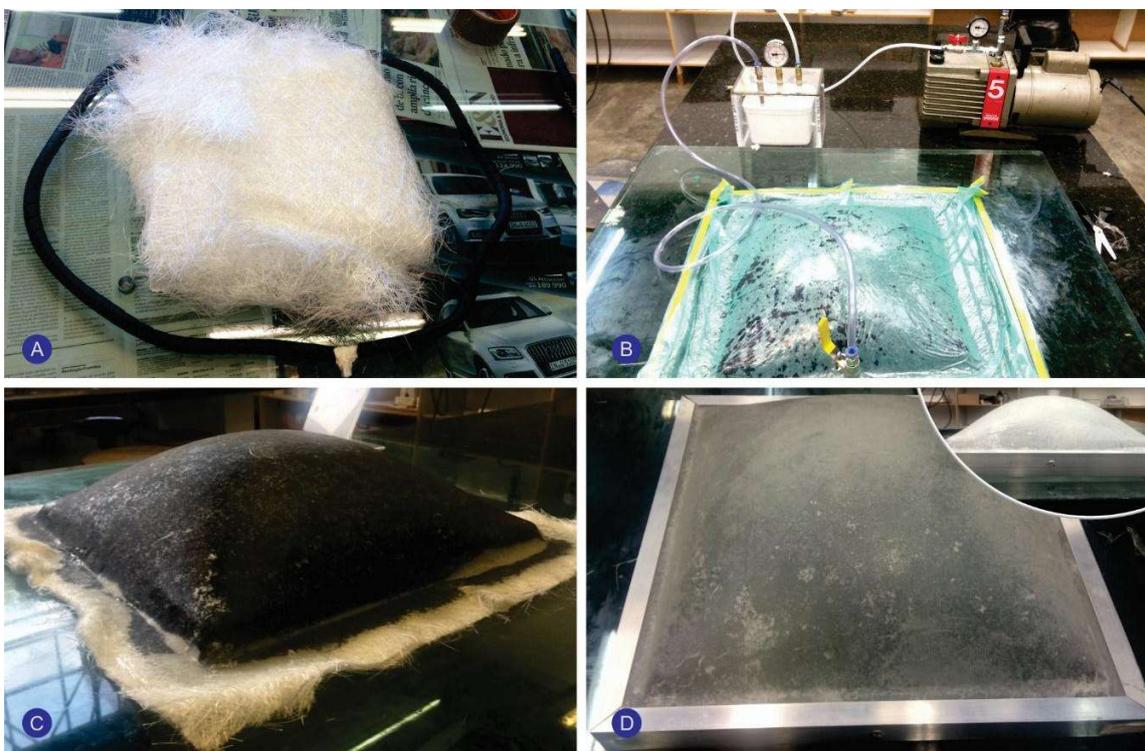
Por último, após o enceramento aplicaram-se duas camadas de Álcool Poli(vinílico) - PVA, depois de dez minutos o álcool havia evaporado deixando seca a camada (figura 117D), além de efetivar o isolamento químico do molde (este foi o procedimento que faltou durante o minicurso anterior). Cada camada foi aplicada com uma esponja, para poder retirar o excesso. Dado que PVA é solúvel em água, ele pode permanecer no molde após a desmoldagem, ou pode sair junto com a peça, e, neste caso, apenas efetua-se a lavagem com água para dissolve-la (fato ocorrido neste experimento).

Depois que o molde se encontra devidamente preparado e selado, procedeu-se à laminação manual, na qual se aplicou uma primeira camada de resina poliéster catalisada com Butanox com concentração de 1,5% (400 ml de resina poliéster para 100 gotas de catalizador). Sobre a resina aplicou-se a fibra, que, nesse caso, foram duas camadas de manta de fibra de vidro (figura 118A), sempre aplicando a resina sobre a fibra da parte mais alta do molde para a mais baixa, para ajuste da manta à peça.

Com todas camadas de resina aplicadas, foram preparados os tecidos que iriam dentro do sistema de vácuo: primeiramente o *peel ply* (tecido branco que não adere ao compósito); sobre ele colocou-se o *breather* (cobertor/manta cinza) para deixar o ar passar e também reter o excesso de resina. Em volta do molde já laminado foi colocado um guia de ar (organizador de cabos) e na junção do mesmo colocou-se a válvula de pressão. Antes desta, colocou-se um pedaço de malha de tecido, para reter a resina caso ela chegasse até ali, e recobrir com um pedaço de *breather* próprio para este local.

Com mesa de mármore própria servindo de base, o sistema (figura 118B) foi selado com auxílio de fita bambam (dupla face), aplicou-se a pressão de 0,6 bar, acima da pressão local, durante uma hora. Esta pressão serviu para dispersar a resina por entre as fibras do compósito.

Figura 118: Laminação com saco de vácuo do compósito GRP.

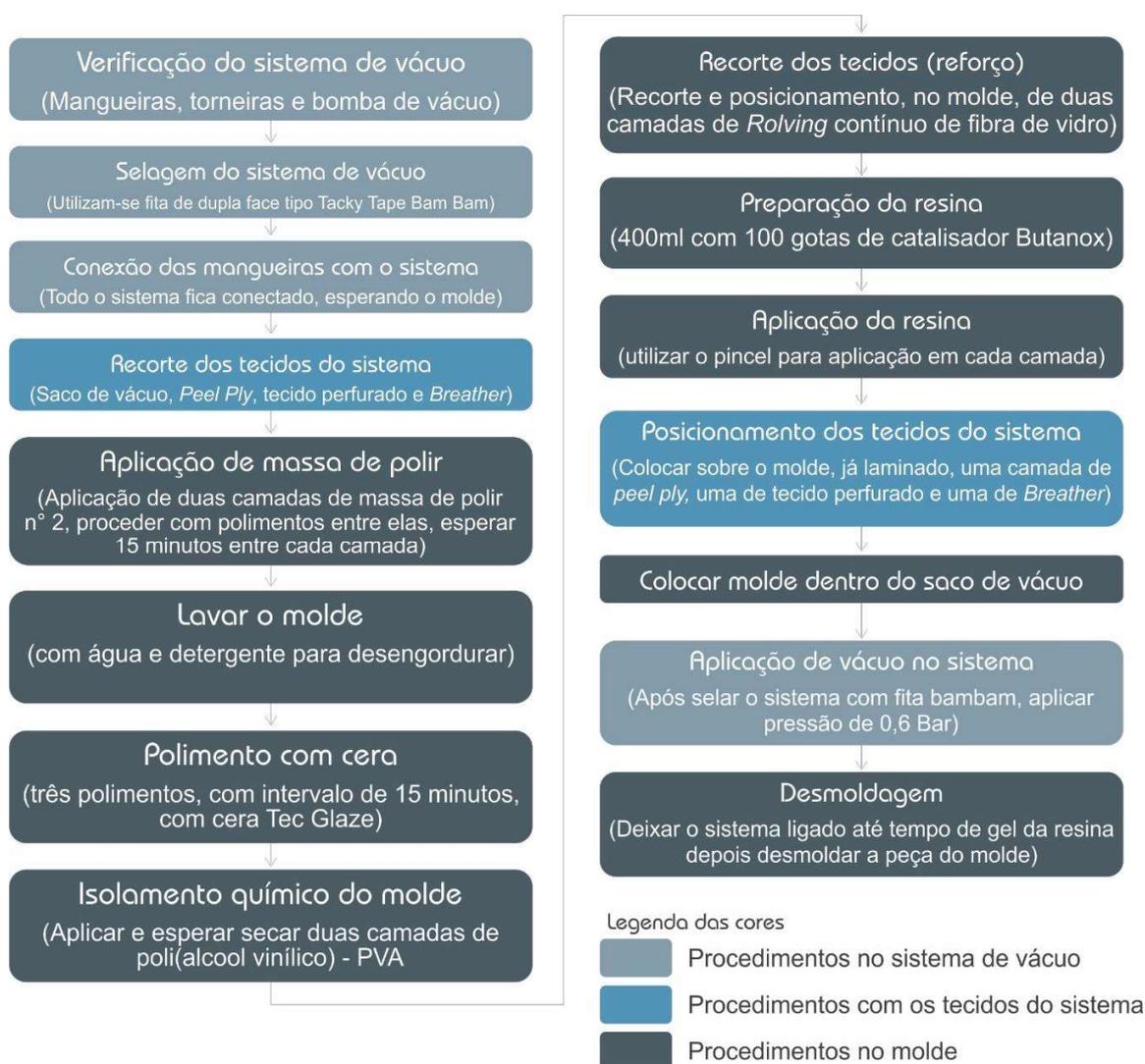


Fonte: Autor, 2019

Para desmoldagem da peça (figura 118C) foram utilizadas cunhas de madeira e espátulas, além de ar comprimido com o intuito de descolar as superfícies da peça e do molde. A peça final é demonstrada na figura 118D já com uma esquadria de alumínio instalada. A bomba de vácuo, com as válvulas de segurança e a peça laminada são apresentadas na figura 118B.

Os fluxos de procedimentos após ajustes proporcionados pelo curso realizado na ALMACO são apresentados na figura 119. Optou-se pela transcrição detalhada do mesmo para que ele servisse de base para as outras duas fases laboratoriais descritas ainda neste capítulo. Deste modo, nas próximas investigações são descritas, para que não haja enfado na leitura, apenas as fases que se diferenciam dos fluxos ora apresentados, mantendo-se o fluxograma de fabricação atualizado.

Figura 119: Fluxos de procedimentos de fabricação previamente definidos



Fonte: Autor, 2019

Para compor o arranjo físico dos ensaios de iluminância, temperatura superficial e fluxo de calor radiante, foram desenvolvidas duas envoltórias idênticas (para controlar as variáveis dos ambientes das superfícies), com placas de fibras de Madeira de Média Densidade - MDF com 3 mm de espessura e medidas externas de 425 x 425 x 700 mm. A modelagem da envoltória foi feita no aplicativo Rhinoceros 3D e o encaixe das superfícies foi parametrizado por meio do *plug-in* Grasshopper e, posteriormente, foram cortadas em máquina CNC a laser, as duas envoltórias podem ser observadas nas figuras 120A e B.

Figura 120: Envoltórias prontas para serem ensaiadas.



Fonte: Omena, Oliveira e Lara, 2016

Os dois conjuntos foram instalados em local sem sombreamento, na cobertura do edifício Vilanova Artigas, na Cidade Universitária, em São Paulo. Para orientação das aberturas, avaliou-se a velocidade e a direção do vento que foram retiradas da rosa dos ventos criada pelo programa Sol-Ar para a cidade de São Paulo. Observou-se que a direção com maior frequência de ocorrência dos ventos é na orientação SE possuindo velocidade entre 3 e 4 m/s no outono, que foi a estação na qual foram realizados os ensaios.

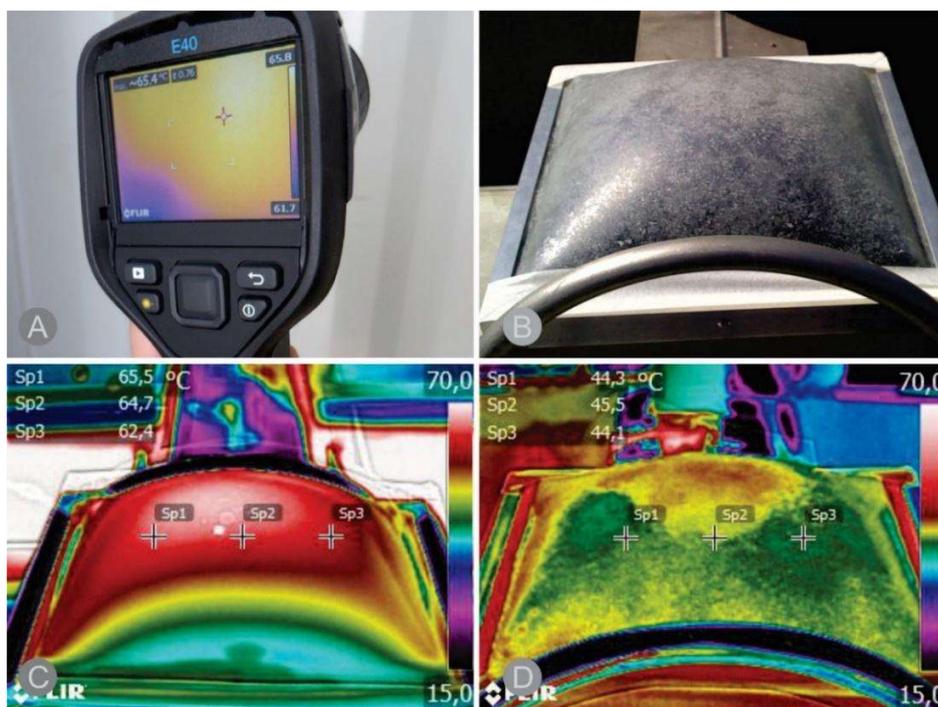
As aberturas foram orientadas na direção SE e NO em virtude de estas serem responsáveis por uma frequência (em conjunto) de aproximadamente 42% das ocorrências de ventos. Estas aberturas permitiram uma vazão mínima de ar, evitando o superaquecimento do ambiente e garantindo condições adequadas para o funcionamento dos equipamentos de medida.

A temperatura ambiente e de globo, umidade relativa e iluminância foram medidas por meio de sensores instalados no interior das envoltórias, cobertas pelas superfícies ensaiadas. A coleta de dados teve início no dia 05/04/2016, às 14 horas, e se estendeu até o dia 13/04/2016, às 16 horas.

A medida de temperatura das superfícies foi feita com uma termocâmera da marca Flir E40 (figura 121A). Além da temperatura, o equipamento também produz imagem da

radiação infravermelha de onda longa (figuras 121 C e D) emitida pelos objetos analisados (figura 121B).

Figura 121: Câmera termovisora e medições.



Fonte: Omena, Oliveira e Lara, 2016

As medidas das variáveis externas foram obtidas com base nos dados coletados pela estação meteorológica do Instituto de Energia e Ambiente IEE nas proximidades do local onde foram expostos os modelos desta pesquisa; a iluminância externa foi obtida a partir do trabalho de Pereira (2006) que realizou medições na Cidade Universidade, no mês de abril, em condições de céu limpo (84.000lux, no dia 12/04, entre 11:00 e 11:15).

A emissividade foi medida por ser um parâmetro necessário à aferição da temperatura de superfícies com termocâmara. O parâmetro foi medido por meio de um emissômetro (figuras 122A e C) nas superfícies externa (figura 122D) e interna (figura 122B) dos domos.

Figura 122: Ensaio de emissividade das superfícies pesquisadas.



Fonte: Omena, Oliveira e Lara, 2016

Nos resultados apresentados, a sigla PMMA representa a superfície de acrílico (figura 122C), e a GRP representa a superfície de compósito de resina poliéster reforçada com fibra de vidro (figura 122D).

Observou-se (figura 123) que ambas as amostras apresentaram resultados de emissividade externa inferiores à interna. A superfície PMMA apresentou emissividades (interna e externa) maiores do que a da superfície GRP. A emissividade das faces internas das envoltórias é de 0,98, por terem sido pintadas de preto fosco.

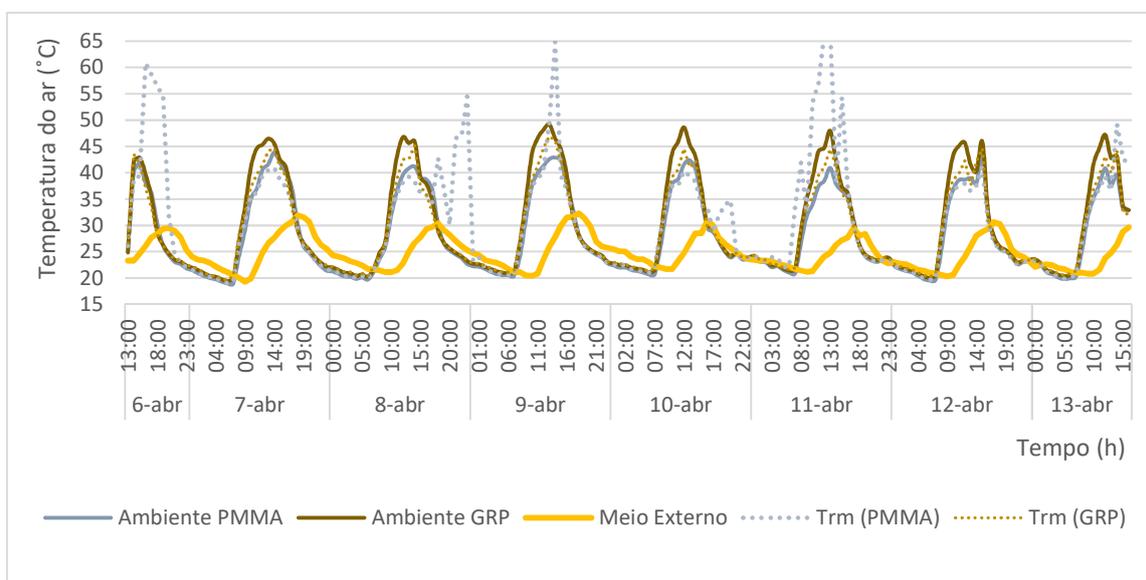
Figura 123: Comparação entre as emissividades das superfícies.



Fonte: Omena, Oliveira e Lara, 2016

A figura 124 apresenta as temperaturas ambientes das envoltórias de cada superfície ensaiada, as temperaturas radiantes médias (TRM's) como dados pontilhados e a temperatura do meio externo durante os ensaios.

Figura 124: Comparação entre as emissividades das superfícies.



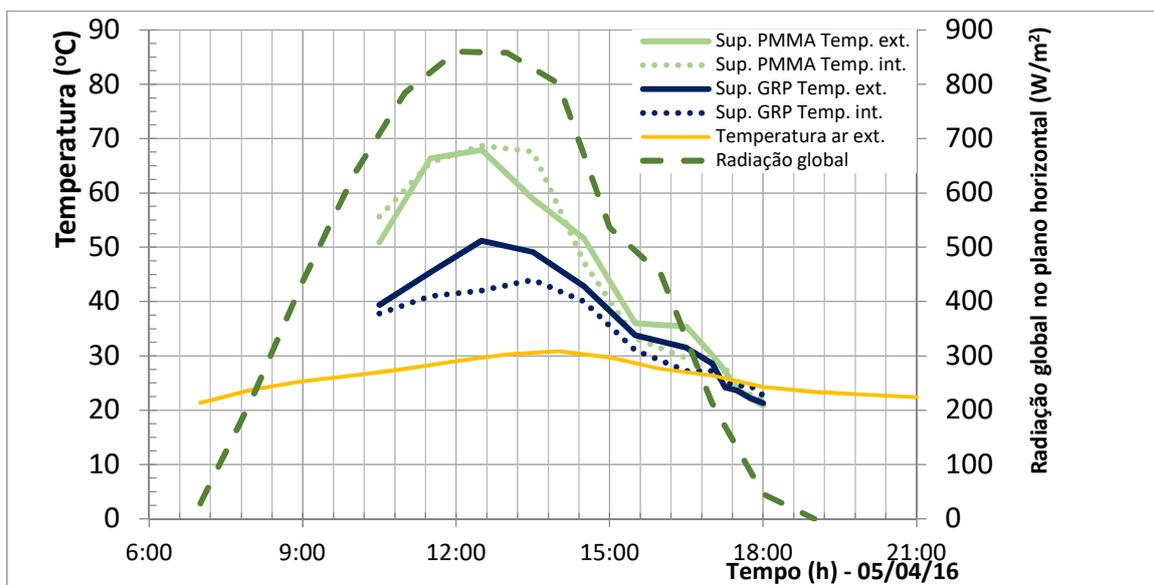
Fonte: Omena, Oliveira e Lara, 2016

As temperaturas radiantes média apresentaram para o ambiente da superfície PMMA valores maiores que o ambiente da superfície GRP (figura 124); é possível que este resultado esteja diretamente relacionado ao fluxo de calor analisado, que apresentou comportamento semelhante.

A análise comparativa das iluminâncias medidas nos modelos foi feita com base na determinação do Fator de Luz Diurna (FLD) que é a razão entre o nível de iluminação interior e o exterior (ABNT, 2005). Foram adotadas as medidas feitas no dia 14/04, às 12:30, com céu limpo. O FLD da superfície PMMA foi de 0,36% enquanto o da superfície GRP foi de 34,43%.

A análise das temperaturas superficiais é apresentada na figura 125, onde os dados pontilhados fazem referência às temperaturas de superfície interna, enquanto os dados de temperatura de superfície externa são apresentados com linha contínua, e os dados de uma mesma superfície estão relacionados por escala monocromática de cor. Apresenta-se ainda a temperatura do ar externo para balizar os dados.

Figura 125: Comparação entre temperaturas de superfície interna e externa.

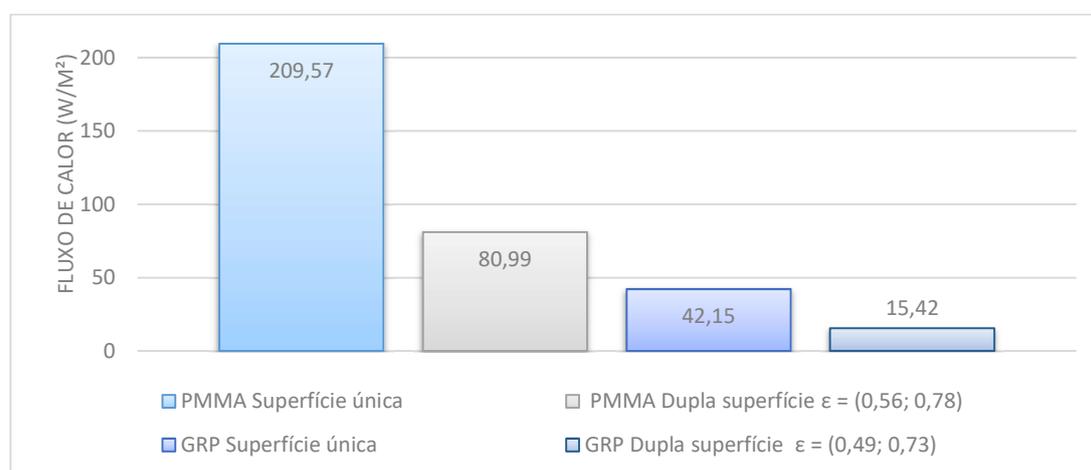


Fonte: Omena, Oliveira e Lara, 2016

Nota-se que as superfícies apresentaram (figura 125) comportamentos similares, com oscilações semelhantes de temperatura, entretanto a superfície PMMA apresentou temperaturas superficiais mais elevadas do que a superfície GRP. Neste sentido, aferiu-se às 12:30 h, uma temperatura superficial interna de 69,9°C para a superfície PMMA e 46,2°C na superfície GRP, o que representa uma diferença de 46,97%. A temperatura superficial interna, por sua vez, no mesmo horário, apresentou valor para a superfície PMMA de 68,7°C enquanto a superfície GRP apresentou temperatura de superfície interna de 42°C, representando uma diferença na ordem de 63,57%.

Após calcular a transferência de calor, foi possível observar que a superfície PMMA irradiou, aproximadamente, 400% mais calor para o ambiente do que a superfície GRP, conforme figura 126. Já na situação teórica de dupla superfície este valor sobe para pouco mais de 425%. Para conhecer o estudo completo desta investigação, ler Omena, Oliveira e Lara (2016)<sup>109</sup>.

Figura 126: Comparação entre fluxos de calor das superfícies.



Fonte: Omena, Oliveira e Lara, 2016

<sup>109</sup> O endereço eletrônico [www.infohab.org.br/entac/2016/ENTAC2016\\_paper\\_464.pdf](http://www.infohab.org.br/entac/2016/ENTAC2016_paper_464.pdf) apresenta o trabalho completo publicado, esta informação também se faz presente nas referências bibliográficas.

Vale ressaltar que resultados parciais deste estudo foi apresentado e elogiado pela mesa mediadora do ENTAC 2016. O reconhecimento se deu, justamente, por utilizar os dados de desempenho como premissa de validação do projeto. Na visão dos avaliadores essa relação entre concepção e fabricação, ao se aproximarem, podem catalisar o processo projetivo. A análise desta segunda etapa do trabalho foi um incentivo para que a pesquisa seguisse perseguindo um ciclo de desenvolvimento de projeto atrelado ao desempenho material.

Após este estudo foi possível notar que as etapas do processo de fabricação foram assimiladas e que seria viável, então, estudar a fabricação por meio de infusão à vácuo (considerado um dos processos de fabricação mais desenvolvidos em termos de materiais compósitos). Este novo estudo (fabricação por infusão à vácuo de geometria oriunda de processo digital de formação baseada em desempenho) efetivou-se em 2017 junto ao IV desafio acadêmico da Sociedade para o Avanço de Materiais e Engenharia de Processos (SAMPE).

### **6.3 Abordagem ao processo de projeto: Desafio SAMPE 2017**

O desafio acadêmico SAMPE Brasil tem a função de proporcionar aos estudantes uma experiência real de projeto de uma estrutura de materiais compósitos. A competição consiste em escolher projetos que expliquem seus processos de concepção e fluxos de procedimentos de fabricação, para posteriormente avaliar o desempenho estrutural das estruturas produzidas. Neste desafio é possível se inscrever em uma das quatro categorias:

- A: Perfil-I em fibra de carbono e/ou aramida para carga de 4.000 kgf •
- B: Perfil quadrado em fibra de carbono e/ou aramida para carga de 4.000 kgf
- C: Perfil quadrado em fibra de vidro para carga de 3.000 kgf
- D: Perfil quadrado em fibra natural para carga de 1.500 kgf

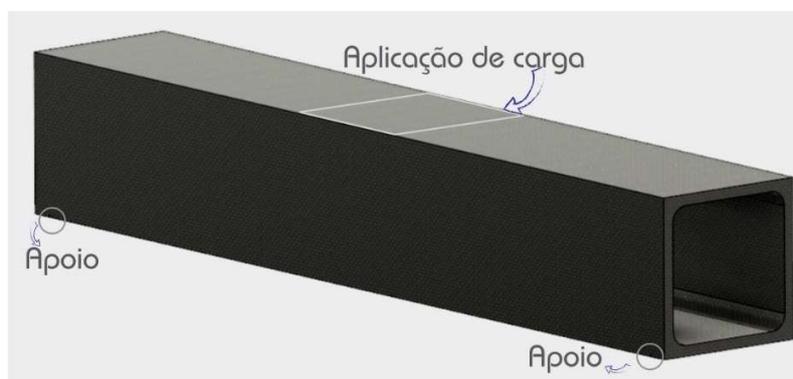
Com a condicionante geométrica de uma peça de 610 mm de extensão com seção quadrada de no máximo 101,6 x 101,6 mm, as estruturas produzidas precisam atingir a carga da categoria escolhida com uma deformação máxima de 1 polegada (25,4 mm).

O projeto apresentado pela presente pesquisa foi selecionado para o desafio (sem ressalvas pela banca). Neste projeto optou-se por trabalhar com fibra natural de piaçava (oriunda de vassoura de limpeza domiciliar) e o processo digital de formação baseada em desempenho foi realizado por meio de otimização topológica no software FUSION 360.

A escolha deste *software* se deu em virtude da busca de maior controle sobre os cantos da geometria produzida por processo de *form-finding1* (forçado) da investigação anterior. Como o processo antigo pode arredondar os cantos, em virtude de ajuste da malha na análise de elementos finitos, o FUSION 360 seria uma boa escolha, por ser um modelador sólido, que permite maior controle das entidades de modelagem além de também trabalhar com otimização topológica.

No início do processo de projeto modelou-se a geometria inicial de seção quadrada da estrutura com 610 mm de comprimento (figura 127). Assim, definiu-se espessura de 10 mm com chanfro de 10 mm nos cantos (já pensando na desmoldagem da peça) e os locais onde a estrutura foi apoiada também foram definidos neste momento.

Figura 127: Modelagem sólida da geometria inicial no FUSION 360.



Fonte: Autor, 2019

Após definir uma área de 101,6 x 101,6 mm, centralizada na face superior, onde posteriormente foi aplicado o carregamento da estrutura, procedeu-se a simulação, cuja configuração iniciou-se com a definição do material utilizado.

Dentro das possibilidades já existentes no *software*, optou-se pelo material *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*, ou compósito polimérico de fibra de carbono. Tal escolha se deu em virtude de ser o único material que utilizava resina epóxi na base de dados do Fusion 360 (na pesquisa se havia optado por trabalhar com esta resina indicada para fins estruturais).

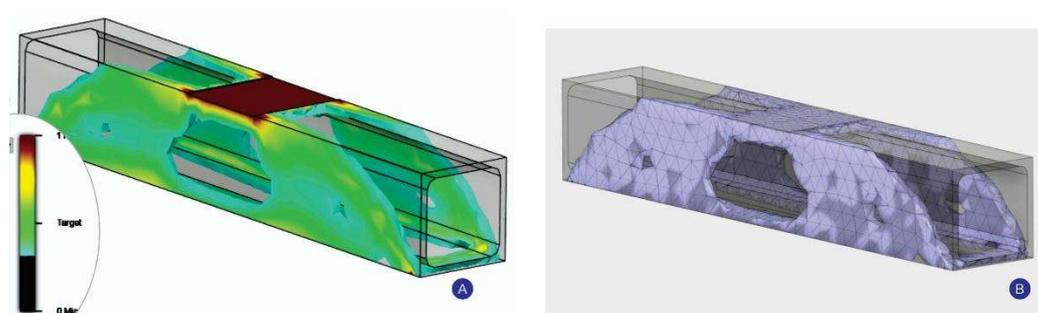
Ressalta-se que esta configuração para a simulação não era a ideal, visto que seria preciso produzir uma placa com os materiais constituintes do compósito real, para então ensaiá-la de acordo com normas específicas responsáveis pela caracterização mecânica. As características mecânicas do material CFRP, fornecidas pelo software e utilizadas na simulação foram:

- Densidade =  $1,43 \times 10^{-6} \text{ Kg/mm}^3$
- Coeficiente de Poisson = 0,39
- Resistência à tração = 577 Mpa
- Calor específico = 1130 J/(Kg.C°)
- Módulo de elasticidade = 133.000 Mpa
- Módulo de Cisalhamento =  $5,3 \times 10^7 \text{ GPa}$
- Condutibilidade térmica = 0,105 W/(mm.C°)
- Coeficiente de expansão térmica =  $9,93 \times 10^{-6} / \text{C}^\circ$

Na simulação definiu-se a carga de 2.500 KgF, aplicou-se o material na estrutura, posicionaram-se os apoios (um fixo e um móvel) na face inferior da geometria, de acordo com delimitações do edital do desafio (vão do teste de 584,20 mm). Na segunda etapa criou-se uma malha para Análise de Elementos Finitos, para depois de aplicar a carga na

área previamente definida na face superior da geometria e, por último, procedeu-se à simulação da estrutura conforme figura 128A.

Figura 128: Simulação inicial da estrutura com aplicação de 2.500 Kgf.

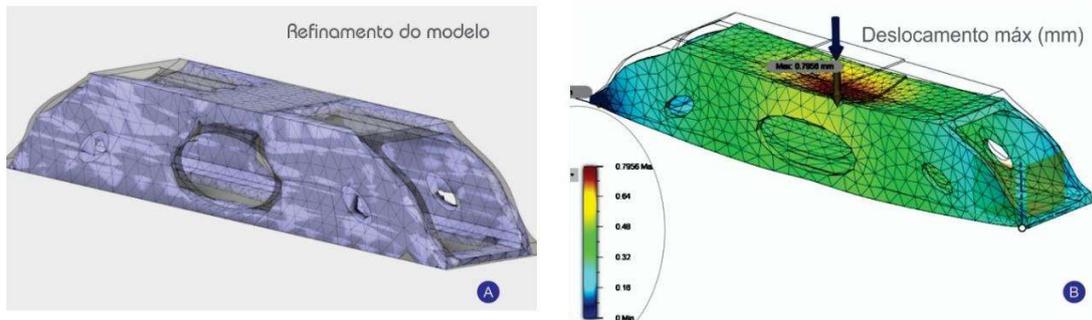


Fonte: Autor, 2019

A figura 128A apresenta as funiculares das forças (caminho por onde elas percorrem). A cor verde é adequada e desejada, enquanto a vermelha representa carga crítica (em virtude de este ser o local de aplicação do carregamento). Note-se que o meio da estrutura não estava sendo utilizado. Deste modo, procedeu-se à remodelagem do projeto, com base nos dados da simulação, conforme figura 128B, que demonstra a geometria inicial sobreposta à resposta da otimização topológica.

Com o refinamento do modelo (figura 129A), depois de retirar o material que não estava sendo utilizado na geometria, procedeu-se à simulação de carga e deflexão máxima conforme figura 129B.

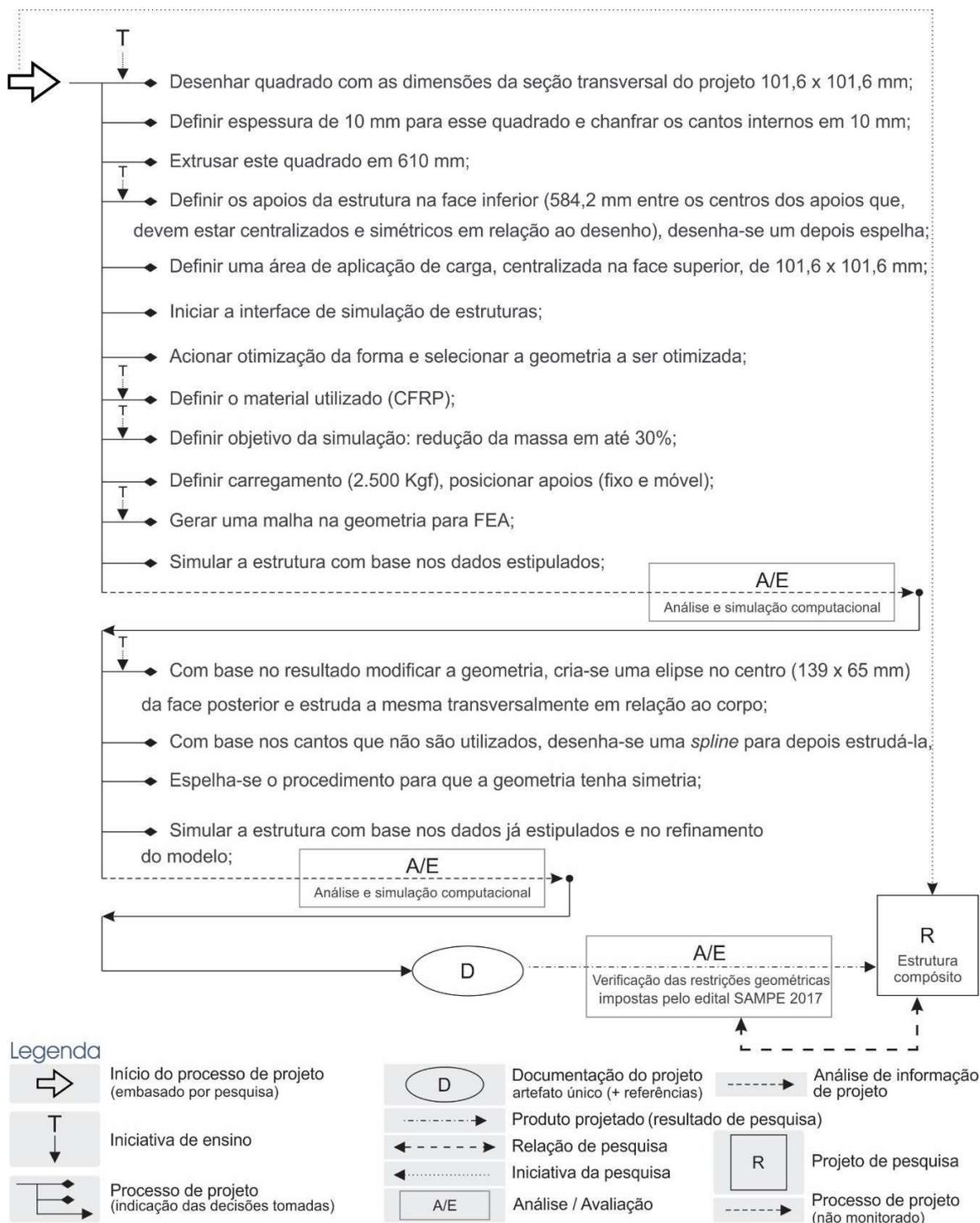
Figura 129: Refinamento do modelo e simulação.



Fonte: Autor, 2019

Nota-se na figura 129B que para a carga de 2.500 Kgf obteve-se um deslocamento máximo de aproximadamente 0,8 mm e como o edital do desafio SAMPE de 2017 aceitava uma deformação de no máximo 1 polegada (25,4 mm), o projeto foi finalizado por estar dentro dos objetivos. O fluxograma dos procedimentos adotados neste processo de projeto é apresentado na figura 130.

Figura 130: Fluxograma do processo de projeto de formação por desempenho



Fonte: Autor, 2019

Segundo o edital do desafio, os materiais deveriam ser entregues a partir de julho, para que a estrutura construída fosse ensaiada no início de outubro, entretanto, o material foi entregue na segunda quinzena de setembro, o que inviabilizou uma importantíssima etapa do ciclo de desenvolvimento do projeto: a caracterização do material.

Para conseguir honrar com as datas do desafio, optou-se por construir a estrutura de compósito de fibra de piaçava sem os ensaios de caracterização, visto que em virtude da escassez de tempo do cronograma, poderia ocorrer desclassificação por conta de não cumprimento de prazo estipulado por edital.

O processo de fabricação iniciou-se com a construção do molde com madeira de eucalipto que foi fresado por Router CNC. A madeira foi previamente fixada à máquina por meio de parafusos. Antecipando certa dificuldade na desmoldagem, optou-se por um molde bipartido (figura 131A) com cantos internos arredondados. Para conseguir fabricar, durante a laminação, os orifícios originados do estudo de otimização topológica, o molde tinha ainda uma peça redonda móvel, que era encaixada através de dois cilindros metálicos, conforme figura 131B.

Figura 131: Molde projetado para fabricar a estrutura.



Fonte: Autor, 2019

Os procedimentos de preparo do molde seguiram o padrão já utilizado na segunda investigação e passaram pelas fases de aplicação Gel Coat com pistola de aspersão automática (figura 132A), regularização da superfície com lixa d'água (figura 132B) e isolamento químico do molde e contramolde com duas camadas de Álcool Poli(vinílico) – PVA. O contramolde também recebeu uma camada de tecido de saco de vácuo em cada uma das paredes de madeira, o molde também recebeu enceramentos com massa de polir número 2 e cera Tec Glaze.

Figura 132: Etapas de preparo do molde e contramolde da estrutura.



Fonte: Autor, 2019

A fibra de piaçava foi retirada de vassoura de limpeza domiciliar (figura 133A), comumente encontrada em lojas de departamentos, para evitar reação química entre fibra e qualquer tratamento existente nas fibras, as mesmas foram banhadas em uma solução de água e soda caustica de concentração 50% (figura 133B). As fibras permaneceram na solução por 2 horas para depois serem secadas com auxílio de papel conforme figura 133C.

Figura 133: Tratamento das fibras de piaçava.



Fonte: Autor, 2019

A fabricação deste compósito foi por infusão à vácuo, deste modo, com as paredes do sistema (fundo e laterais) seladas, procedeu-se ao recorte dos tecidos do sistema *peel-ply*, tecido perfurado e saco de vácuo (figura 134A). A parede de cima do contramolde do sistema de vácuo foi produzida por acrílico de espessura 12 mm, onde foram feitas aberturas, para infusão da resina e inserção do vácuo conforme figura 134B.

Figura 134: Molde projetado para fabricar a estrutura.



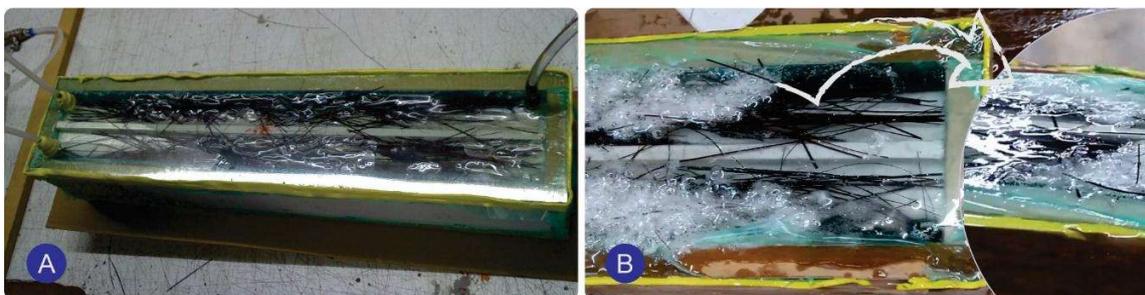
Fonte: Autor, 2019

Depois de manualmente posicionar as fibras sobre o molde e coloca-los dentro do contramolde, utilizou-se resina epóxi HEX 135 (1 Kg) com endurecedor *Slow* HEX 135 (0,33 Kg), previamente misturadas em um recipiente plástico (figura 134C), para com auxílio de mangueira plástica e sistema de vácuo inseri-la no molde com as fibras naturais.

Mesmo depois de utilizar fita tacky tape de dupla face para selar a face superior do contramolde, percebeu-se, durante a inserção de vácuo, que havia ar entrando no sistema, para solucionar este problema, todo o sistema de fabricação foi selado com saco de vácuo conforme figura 134D.

O tempo médio de catalisação da resina de infusão à vácuo varia de poucos minutos até aproximadamente 30 minutos (depende do catalizador). Com a bomba em funcionamento com tempo superior a este, percebeu-se que a resina enviada pelo desafio SAMPE não era uma resina de infusão, mas sim de laminação à vácuo, com endurecimento lento (mesmo o projeto tendo solicitado uma resina para infusão). Assim, a bomba teve que ficar ligada por uma hora e meia até início de catalisação da resina, com o tempo foi possível observar que bolhas de ar haviam se formado (figuras 135A e B), resultado este altamente indesejado, visto que quanto maior a quantidade de ar no sistema, menor é sua resistência final.

Figura 135: Molde projetado para fabricar a estrutura.



Fonte: Autor, 2019

O aparecimento de bolhas pode ter ocorrido por dois fatores, o primeiro é a selagem do sistema que pode não ter sido efetiva, o segundo pode ter sido o fato de que o tratamento químico da fibra pode não ter sido retirado com o banho de soda caustica, ou por conta do tempo de repouso, ou por conta do próprio solvente utilizado. Em todos os casos percebeu-se que houve reação química entre a fibra e a resina.

Depois de 24 horas a peça foi desmoldada com auxílio de máquina de corte para retirar o excesso resina sobressalente (figura 136A), com isso foi possível coletar a estrutura (figura 136B) e pesá-la (figura 136C). O peso aferido foi de 2,180 Kg, considerando que

foram utilizados 1,030 kg de resina e 1,150 Kg de fibra de piaçava, o compósito obteve uma fração mássica de fibra e resina de 1,12 (52,75% de fibra e 47,25% de resina).

Figura 136: Molde projetado para fabricar a estrutura.



Fonte: Autor, 2019

Após a fabricação do compósito foi possível perceber que o fornecimento de resina para laminação ao invés de infusão foi prejudicial para o processo e ocasionou erros inesperados, bem como o uso de fibras naturais (quando estas possuem tratamento químico) podem ocasionar reações com a resina. Para este compósito específico, notou-se que o tratamento com soda, com o tempo estipulado, foi ineficaz.

O aspecto positivo observado é que com a resina qualificada ao procedimento, seria possível realizar fabricação de compósitos poliméricos por infusão à vácuo por mão de obra não especializada, com auxílio do fluxo de procedimento utilizados nesta fabricação (figura 137).

Figura 137: Fluxos de procedimentos de fabricação previamente definidos



Fonte: Autor, 2019

No que tange a análise do desempenho estrutural da peça produzida, ela foi aferida no dia estipulado pelo desafio SAMPE 2017, onde a máquina universal de ensaios Instron, aumentou o carregamento de modo constante até levar as estruturas à ruptura, conforme figuras 138A e B. Como afirmado anteriormente, o objetivo era atingir a carga de 1500 Kfg com deformação menor do que uma polegada (25,4 mm).

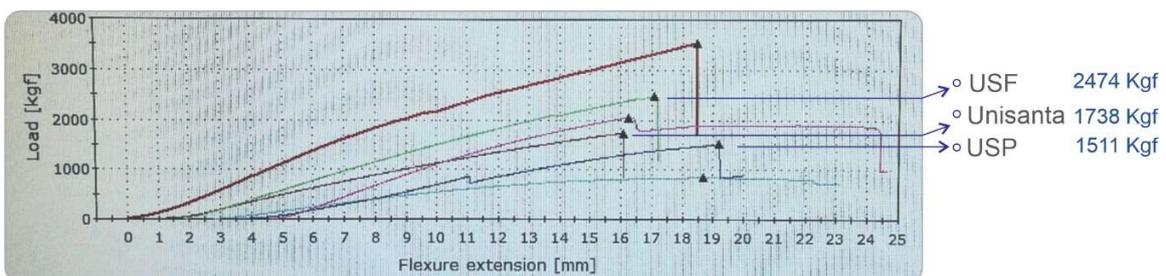
Figura 138: Ensaio da estrutura quanto à desempenho mecânico.



Fonte: Autor, 2019

Os resultados disponibilizados pela máquina de todas as estruturas que competiam podem ser visualizados na figura 139, o primeiro lugar foi da Universidade São Francisco (USF) que resistiu 2474 Kgf, o segundo lugar foi da Universidade Santa Cecília com 1738 Kgf e o terceiro lugar foi da estrutura feita por esta pesquisa com resultado de 1511 Kgf e pouco mais de 16 mm de deformação, ressalta-se que as menores relações entre resistência e peso próprio foi utilizada para classificação.

Figura 139: Resultados dos ensaios de resistência mecânica.



Fonte: Autor, 2019

Ao utilizar o peso próprio da estrutura desta pesquisa como base (2,180 kg) foi possível chegar uma relação entre resistência e peso próprio, valor este que é comumente

utilizado para uma análise rápida de desempenho estrutural em materiais. A relação obtida pelo compósito de resina epóxi e fibra de piaçava foi de 693, que representa a quantidade de vezes que é preciso aumentar a carga permanente da estrutura (peso próprio) para que ocorra a ruptura.

Por fim, após a finalização do ensaio, na pesquisa optou-se por buscar aperfeiçoar o processo de projeto, isto porque, como havia sido previsto, era necessário caracterizar o compósito antes de fabricar a estrutura e leva-la à teste. Com isso, o ciclo de desenvolvimento do projeto poderia ser mais efetivo e preciso além de apresentar resultados melhores e mais confiáveis.

Deste modo, durante a pesquisa se inscreveu, em 2018, novamente no desafio SAMPE, entretanto optou por participar da categoria B que utiliza fibra de carbono (por ser uma fibra estrutural, e também por esta eliminar a possibilidade de reação química entre fibra e resina como aconteceu com a piaçava).

#### **6.4 Aperfeiçoamento do processo: Desafio SAMPE 2018**

Após a experiência anterior constatou-se que as discussões presentes nas teorias de processo de fabricação *High/Low* e regionalismo paramétrico eram passíveis de serem utilizadas com tecnologias construtivas de infusão à vácuo. Observou-se, também, que durante o desafio SAMPE, a presente pesquisa foi a única que apresentou este método de fabricação, visto que as outras equipes inscritas produziram suas pontes por meio de laminação manual (volume de vazios maior, podendo afetar negativamente a resistência da peça).

Ressalta-se que este resultado ajudou a validar a hipótese de que o processo digital performático deve definir o material, além de aferir seu desempenho, já nas fases iniciais do ciclo de desenvolvimento do projeto. Por conta do tempo entre entrega de material e produção da ponte, não foi possível caracterizar o compósito de fibra natural no desafio de 2017, o que comprometeu os resultados (aspecto negativo observado).

Na versão de 2018, esta caracterização do material tornou-se imperativa, visto que esta participação do desafio SAMPE seria a última experiência da presente pesquisa.

Ainda neste tocante, esta investigação queria mostrar que era possível trabalhar com material compósito de alto desempenho estrutural e também controlar os aspectos construtivos relacionados ao controle da continuidade da curvatura de morfologias oriundas de processos digitais de formação baseada em desempenho. Em outras palavras, na pesquisa a intenção era provar que era possível construir, com materiais compósitos poliméricos, curvaturas com continuidade  $C^2$  (que compartilham tangência) oriundas de processos digitais de projeto.

Isto posto, na versão de 2018 do desafio acadêmico SAMPE optou-se por participar na categoria que poderia utilizar fibra de carbono e/ou aramida. Nesta categoria a carga suportada pela peça (também com dimensões iniciais de 610 x 100 x 100 mm) deveria ser de 4000 Kgf (em um sistema de ensaio de três pontos com aplicação de carga no ponto central em uma área de 100 x 100 mm). A ponte deveria apresentar uma deflexão máxima de até 1 polegada (25,4 mm).

Durante o ciclo de desenvolvimento do projeto anterior, notou-se que utilizar a seção da estrutura com as dimensões máximas prevista no edital (101,6 x 101,6 mm) poderia ser arriscado, visto que poderia existir qualquer imperfeição na peça que inviabilizasse sua participação. Deste modo, como fator de segurança geométrica, optou-se por reduzir a seção para as dimensões de 100 x 100 mm, o que resultou em 1,6 mm de folga construtiva.

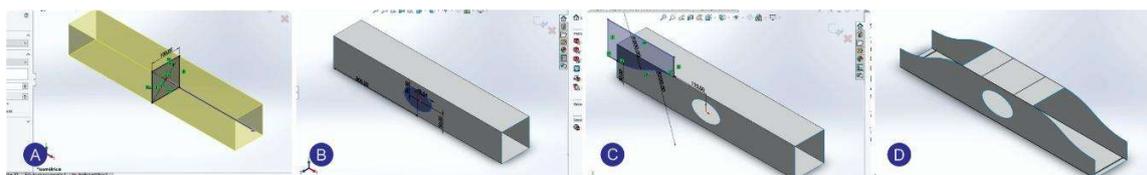
Mesmo que o início do processo deva começar pela caracterização física do material (visto que somente assim, é possível ter conhecimento dos limites em que este material pode trabalhar), é preciso realizar uma simulação prévia com base na estimação de parâmetros de resistência. Com o tempo os projetistas vão adquirindo banco de dados dos materiais já testados em ciclos anteriores. Este processo, que trabalha com retroalimentação e aperfeiçoamento, facilita a concepção projetiva de projetos baseados em desempenho material.

Em ciclos de desenvolvimento de projeto como o supracitado é preciso primeiro simular a estrutura, com base em algum tipo de dado relativo à caracterização, para depois fabricar uma peça com as características simuladas para então testá-la. Assim, com os novos dados, simula-se novamente a estrutura, repetindo os procedimentos até atingir os resultados solicitados no escopo do projeto.

Para esta nova investigação projetiva, utilizaram-se os dados adquiridos durante o desafio anterior, além das características do material CFRP, presentes no software FUSION 360. Com isso, foi necessário modificar a carga utilizada na otimização topológica, que antes era de 1500 kgf e passou para 4200 kgf (4000 Kgf + 5% de como fator de segurança).

Com o resultado da simulação, as características físicas do compósito encontradas no *software* FUSION foram inseridos na base de dados do SolidWorks 2018 da fabricante Dassault Systemes (mesmo fabricante do Catia). As propriedades físicas (iniciais) foram aplicadas à geometria inicial da peça (figura 140D). A mudança de software de modelagem sólida se deu em virtude de vontade de verificar se os procedimentos em programas diferentes seriam similares.

Figura 140: Modelagem da geometria



Fonte: Autor, 2019

O processo de modelagem após a simulação (que mostrava as áreas que poderiam ser suprimidas por não serem utilizadas) iniciou-se com a criação de uma superfície de extrusão (de 100 x 100 mm) para que, com alongamento a partir do plano médio, a mesma adquirisse comprimento definido por edital (610 mm), conforme figura 140A.

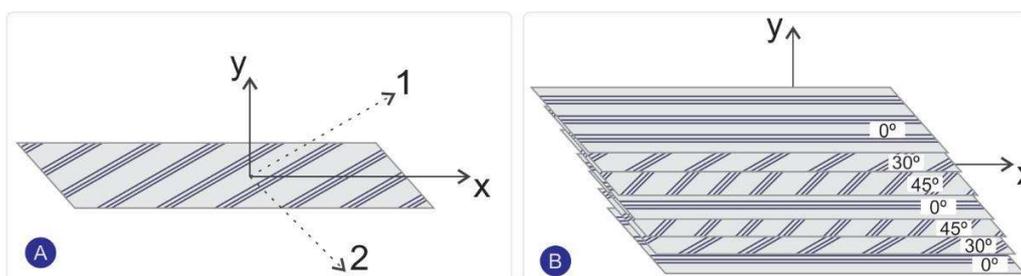
Após este procedimento desenhou-se a elipse no centro da estrutura, desta vez com dimensões áureas, raio menor de 30 mm e raio maior de 48,54 mm. Assim, utilizou-se a dimensão inteligente que fixa o posicionamento da elipse em relação a distância do início da geometria da peça (movendo um, automaticamente move-se o outro), como pode ser observado na figura 140B (a elipse foi posicionada no centro das faces de frente e fundo da estrutura, para depois ser aparada da superfície).

Para produzir curvas suaves nas bordas, com continuidade  $C^2$ , foram modelados dois arcos que compartilham tangência, conforme figura 140C. Este processo foi espelhado para os demais cantos da estrutura que não estavam sendo utilizados, verificados através de otimização topológica previamente realizada. Optou-se por recortes maiores nos cantos da estrutura, pois, na pesquisa, a intenção era retirar a maior quantidade de material possível, visto que a ponte campeã seria aquela que atingisse a resistência de projeto e tivesse o menor peso próprio. Por último dividiu-se a superfície superior para posicionar o local de aplicação da carga na simulação, além de localizar os locais onde seriam colocados os apoios.

Uma ressalva que dever ser realizada é que, para melhor compreender o dimensionamento de materiais compósitos, na pesquisa optou-se por fazer o último curso da ALMACO intitulado de análise de tensões e deformações em materiais compósitos poliméricos. Neste curso alguns apontamentos ficaram evidentes e auxiliaram o ciclo de desenvolvimento de projeto.

Assim, para simular um material compósito é necessário saber a direção, o sentido, a grandeza e o plano onde atuam as tensões e deformações, pois o reforço da estrutura (fibras) é majoritariamente colocado no sentido onde ocorrem estas tensões. Como este tipo de material é composto por diversas camadas, no caso das fibras estruturais é possível orientá-las com diversas angulações, conforme demonstra a figura 141B.

Figura 141: Orientação das fibras em um compósito hipotético



Fonte: Autor, 2019

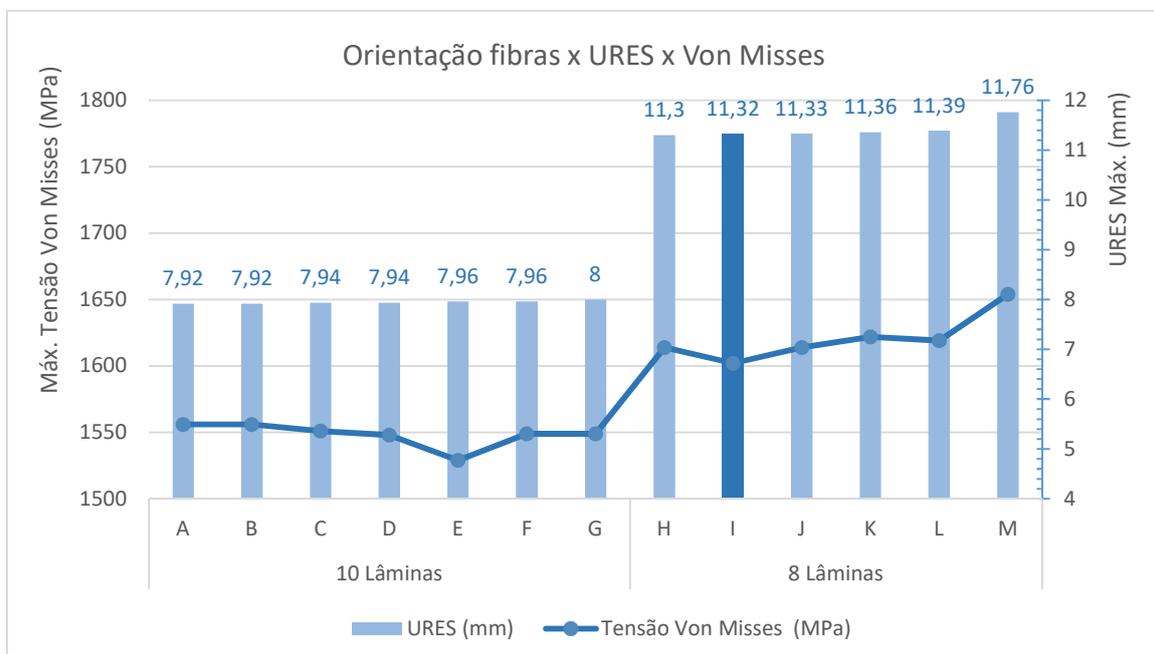
A figura 141A apresenta o eixo global ( $x$  e  $y$ ) em uma única camada da estrutura, onde o ' $x$ ' representa o eixo axial (que representa o sentido de orientação das fibras nesta camada do compósito, que neste caso também coincide com o comprimento da estrutura). A figura 141B por sua vez apresenta um compósito polimérico hipotético com 7 camadas de fibras. Quando se apresenta a orientação das mesmas, entre colchetes, tem-se o que a literatura chama de *Standard Laminate Code* (SLC), ou código de laminação padrão.

O SLC do compósito da figura 141B é  $[0; 30; 45; 0; -45; -30; 0]^E_T$ . Neste código, a letra 'E' refere-se ao tipo de resina (epóxi) e a letra 'T' faz referência ao termo 'total', que diz que o código de laminação apresenta todas as camadas que devem ser dispostas durante a fabricação do compósito. Este procedimento auxilia a fabricação dos compósitos a não trocar a orientação das camadas definidas no projeto.

Utilizar tecidos com orientação unidirecional efetiva um maior controle do material e da resistência do mesmo, já com tecidos bidirecionais é possível conseguir maior facilidade de fabricação, visto que cada camada vem com duas orientações perpendiculares entre si. Isto posto, um material compósito que possua os mesmos constituintes de um outro compósito qualquer, entretanto, com orientações diferentes (mesma resina, mesma fibra e mesma quantidade de camadas), possuem resistências diferentes, e, por isso, são chamados de materiais completamente distintos (por que possuem características que não são iguais), cada qual precisando de sua própria caracterização para que suas resistências sejam conhecidas.

Voltando ao processo de projeto, foi preciso configurar as orientações e a quantidade de camadas do compósito CFRP no programa SolidWork. Considerando que o curso da ALMACO explicou que uma camada de tecido de fibra de carbono (seca) possui aproximadamente 0,25 mm de espessura e, quando resinada, entre 0,35 e 0,4 mm (utilizou-se 0,35); foi possível realizar simulação para encontrar uma deformação dentro dos limites do edital, conforme figura 142

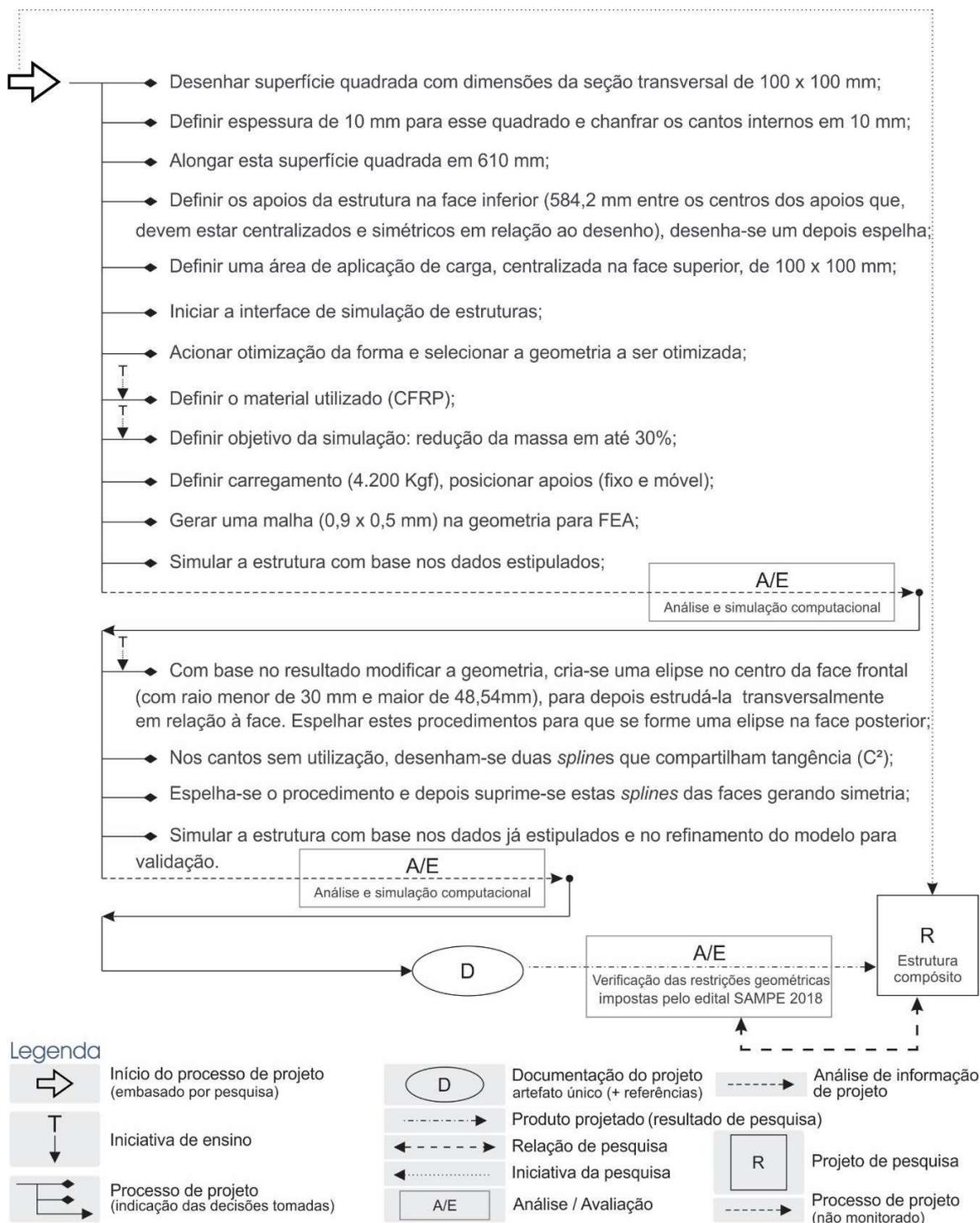
Figura 142: Percentagem da deformação máxima admissível x espessuras simuladas



Fonte: Autor, 2019

Como o foco da pesquisa era tentar obter o melhor resultado com o menor peso da estrutura, optou-se por oito camadas de tecido, visto que com 10 a deformação estava bem abaixo da permitida em edital (25,4). Na figura 144 apresentam-se os resultados das simulações quanto a quantidade e orientação das fibras (cada letra faz referência à um SLC), apresentam-se ainda a tensão Von Mises máxima atuante na peça e o deslocamento máximo URES, este é uma combinação das deformações ocorridas em todos os eixos da peça estrutural. A figura 143 apresenta o fluxo de procedimentos realizados.

Figura 143: Fluxograma do processo de projeto utilizado



Fonte: Autor, 2019

Com este processo foi possível chegar à uma quantidade de 8 camadas de tecido de fibra de carbono, que resultou em um com espessura aproximada de 3 mm e um *Standard Laminate Code* de  $[0; 0; 30; 45; -45; -30; 0; 0]^E_T$ , sendo este o SLC utilizado durante a fabricação da peça.

Neste momento produziu-se, com saco de vácuo, (figuras 144A e B) uma placa do compósito CFRP com 8 camada e SLC supracitado, para que então fossem cortados os corpos de prova para ensaio de tração transversal e longitudinal. Com os resultados destes ensaios, seria possível continuar o refinamento do material até atingir a resultado definido em projeto.

Figura 144: Fabricação da placa de compósito CFRP para ensaio de tração



Fonte: Autor, 2019

Entretanto, assim como aconteceu no ano anterior, a equipe organizadora do desafio SAMPE entregou os materiais com atraso, desta vez na segunda semana de outubro com agendamento prévio de ensaio das estruturas para a primeira semana de novembro. Como a pesquisa já havia previsto esta possibilidade, e como nos últimos seis meses de doutoramento o CNPq disponibilizou uma bolsa pró doutoral, haviam recursos financeiros para custear os ensaios laboratoriais de caracterização.

Assim foram consultados dois laboratórios técnicos da cidade de São Paulo quanto à disponibilidade em entregar os resultados em tempo hábil: o Instituto de Pesquisas

Tecnológicas (IPT), dentro da Universidade de São Paulo e o Laboratório de Estruturas Plásticas do Senai Mario Amato em São Bernardo do Campo.

O último local não forneceu resposta satisfatória até o presente momento, razão pela qual optamos pelo segundo. Contudo, em virtude do fluxo de trabalho que o mesmo recebeu, o resultado foi enviado por e-mail no dia 15 de fevereiro de 2019. Considerando que o ensaio das estruturas ocorreu em novembro de 2018, mais uma vez a otimização do material foi inviabilizada por motivos alheios à pesquisa. Ressalta-se que o IPT custeou os ensaios e que, por isso, faz-se mister agradecê-lo publicamente, visto a importância para a pesquisa, bem como a grandeza de todo e qualquer incentivo à ciência de maneira geral.

No que tange a fabricação do compósito, esta iniciou-se pela regularização da superfície (figura 145A) da madeira utilizada para fabricar o molde, que foi fresado por Router CNC (figura 145B). Depois de lixado, o molde foi unido (figura 145C) com a peça produzida para o centro (do mesmo modo que foi feito na investigação anterior), e por fim verificou-se o encaixe do mesmo no contramolde (como previsto havia uma folga de 1,6 mm para trabalhabilidade) conforme figura 145D.

Figura 145: Fabricação digital do molde da estrutura



Fonte: Autor, 2019

O isolamento químico do molde seguiu os processos já validados pelas investigações anteriores e passou pelas fases de aplicação com pistola automática de aspersão de duas camadas de Gel Coat (figura 146A), seguido de dois enceramentos com massa de polir (figura 146B), dois polimentos com cera Tec Glaze (figura 146 C) e mais três de mão de desmoldante PVA.

Figura 146: Isolamento químico do molde



Fonte: Autor, 2019

Na hora de preparar o tecido de fibra de carbono (figura 147A), observou-se que a empresa havia mandado tecido bidirecional ao invés de unidirecional, isso acarretaria um pouco de diminuição na resistência visto que a densidade era menor ( $200 \text{ g/m}^2$ , ao passo que o unidirecional tinha densidade de  $300 \text{ g/m}^2$ ).

Figura 147: Fabricação do compósito por saco de vácuo



Fonte: Autor, 2019

Por outro lado, um tecido bidirecional facilitaria o processo, visto que a resistência em qualquer direção seria a mesma. Assim, depois de cortar as camadas do SLC, como a pesquisa já havia previsto que a empresa responsável pelo envio dos materiais não enviaria resina para infusão à vácuo, foi preciso fabricar o compósito por laminação e saco de vácuo (figura 147B).

Na hora de posicionar as camadas, já laminadas, no molde, notou-se que a fibra com a adição da resina apresenta estiramento, o que dificultou um pouco o trabalho, visto que surgiram vincos que necessitaram de ajustes. Depois deste procedimento colou-se uma camada de peel-ply, uma de manta perfurada, Breather na saída de vácuo e se fechou todo o sistema com saco de vácuo, canaleta de alumínio e mangueira de borracha, conforme figura 147C. O molde com a peça endurecida, e o resultado final desmoldado, podem ser visualizados na figura (147D). O fluxo de procedimentos de fabricação pode ser conferido na figura 148.

Figura 148: Fluxos de procedimentos de fabricação previamente definidos



Fonte: Autor, 2019

No dia do desafio SAMPE 2018 sete estruturas estavam inscritas na categoria B. A peça produzida pela presente pesquisa foi a que apresentou menor peso 577 gramas e menor espessura com 3 mm (o que validou a espessura estimada pelo curso da ALMACO de 3,5 mm por camada).

Foram utilizados 385 gramas de tecido de fibra de carbono e 192 gramas de resina epóxi, o que conferiu à estrutura uma relação de fibra/resina de 2,0 unidades (adimensionais). Com isso, a constituição deste compósito foi de 66,72% de fibras e 33,27% de resina (uma boa relação conforme literatura própria, que afirma que com método de laminação por saco de vácuo é possível conseguir relações com até 70% de fibras e 30% de resina).

Mesmo com o cuidado de acertar o tecido ao molde, visualmente a peça apresentou alguns vincos, relacionados ao estiramento do tecido durante o processo de fabricação. A banca pontuou que, em se tratando de compósitos estruturais e curvaturas, o melhor é produzir a peça, para depois cortar as partes que se deseja da superfície, isto porque, segundo eles, ao produzir, como a presente pesquisa o fez, é possível que haja concentração de tensões e/ou acomodação indesejada de tecido (como de fato aconteceu). As estruturas ensaiadas no dia do desafio podem ser conferidas na figura 149.

Figura 149: Estruturas ensaiadas no dia do desafio SAMPE 2018

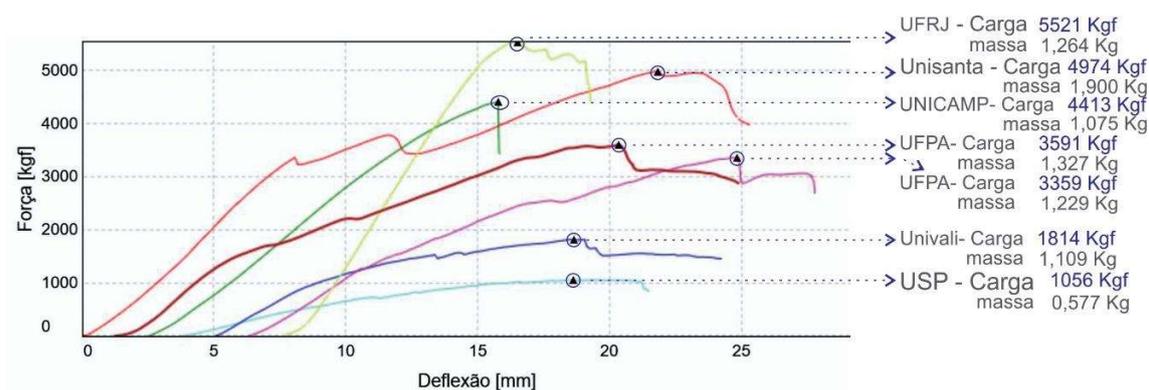


Fonte: Autor, 2019

Já numa primeira análise inicial percebeu-se que a estrutura produzida por esta pesquisa era uma das poucas que procurava trabalhar com curvas, e que também era a que

apresentava menos robustez, o resultado dos ensaios das pontes pode ser conferido na figura 150.

Figura 150: Resultado do ensaio realizado no dia do desafio SAMPE 2018



Fonte: Autor, 2019

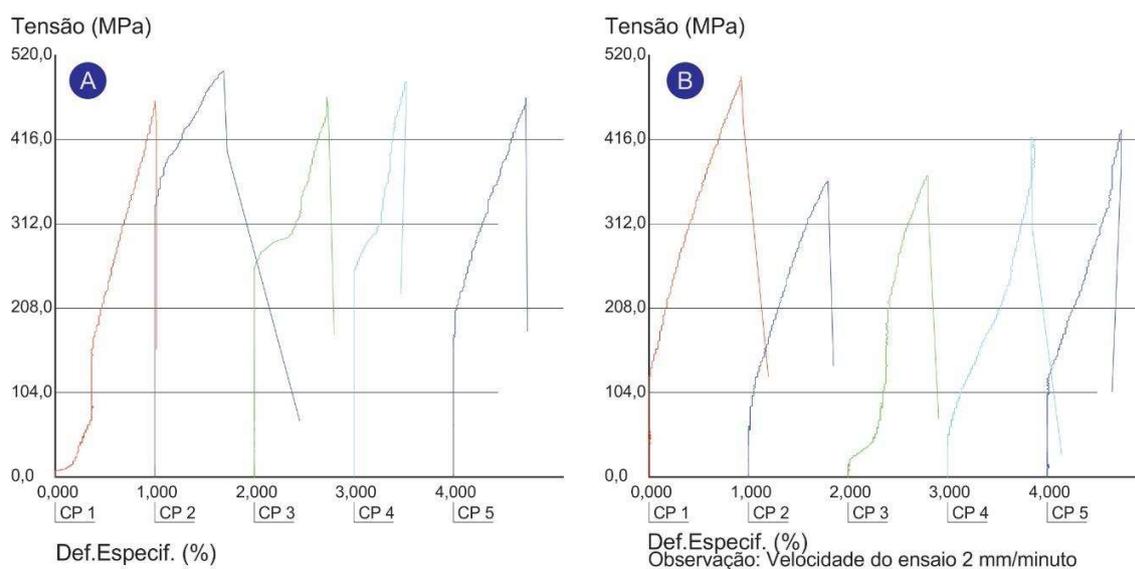
Nota-se que as únicas universidades classificadas foram a UFRJ, a Unisanta e a Unicamp (está última em primeiro lugar visto que apresentou a menor massa). Todas as outras estruturas foram desclassificadas por não resistirem à carga de edital, o que incluiu a ponte produzida pela presente pesquisa, que tinha massa de 0,577 Kg e entrou em escoamento com 1056 Kgf.

Percebe-se que era estritamente necessário refazer a simulação com os dados advindos do desempenho do material. Visto que, com isto, teria sido possível perceber que a estrutura precisaria ser redimensionada, uma vez que, com os dados do ensaio, seria notado que existiam áreas da estrutura que apresentavam solicitação superior à tensão de ruptura. Isto pode ser afirmado após análise dos resultados enviados pelo IPT conforme figuras 151.

Os resultados do ensaio de tração dos cinco corpos de provas longitudinais são apresentados na figura 151A, nos quais obteve-se tensão de ruptura média de 476,6 Mpa e módulo de elasticidade médio de 79.870 Mpa. Já os corpos de prova transversais ao compósito (figura 151B) apresentaram tensão de ruptura média de 414,7 Mpa e módulo de

elasticidade médio de 103.400 Mpa. Os valores próximos nas duas direções se deram em virtude de o tecido ter orientação bidirecional de fibras.

Figura 151 Resultados dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova

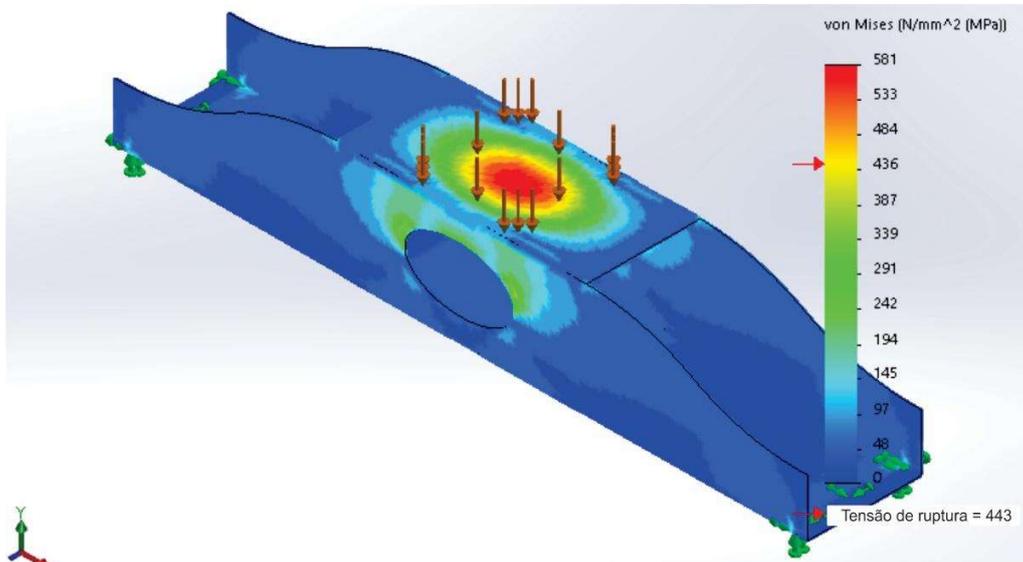


Fonte: Autor, 2019

Em posse destes dados, realizou-se outra simulação na estrutura para verificar a validade do ciclo de desenvolvimento de projeto e se os dados de desempenho tivessem chegado em tempo.

Observou-se (figura 152) que a área de aplicação de carga apresentou tensão Von Mises superior à tensão de ruptura, com estes dados, o ciclo de desenvolvimento do projeto poderia ter simulado a estrutura com mais camadas, além de simular outras orientações entre elas, para posteriormente produzir outra peça e ensaiá-la à tração, até chegar ao resultado desejado.

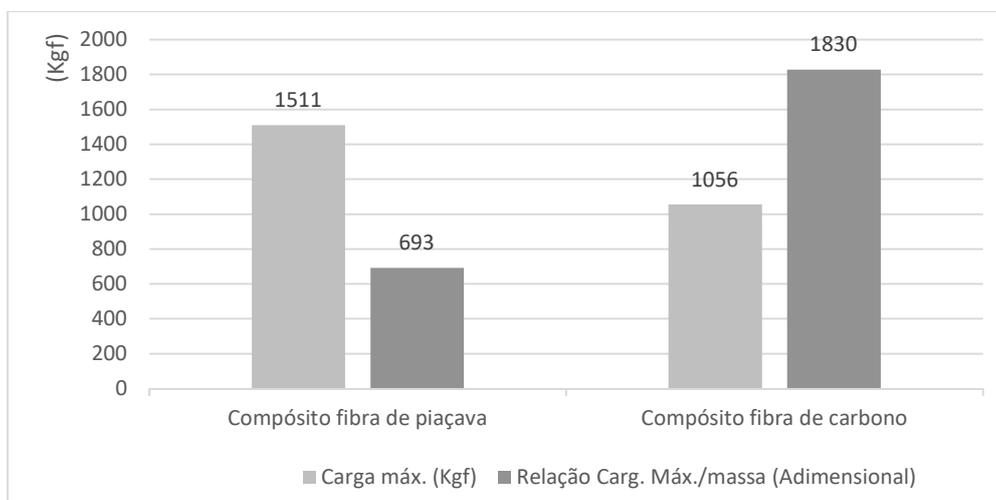
Figura 152: Simulação da estrutura após resultados de ensaio de tração



Fonte: Autor, 2019

Obviamente a ideia era conseguir o máximo do material, entretanto, levando em consideração que esta foi a primeira vez que na presente pesquisa trabalhou-se com fibra de carbono, considera-se o resultado do ciclo de desenvolvimento do projeto bastante positivo. Observa-se, também, que mesmo com os equívocos supracitados conseguiu-se um material com qualidades consideráveis como demonstra a figura 153 que compara os compósitos produzidos pelas últimas duas investigações deste trabalho.

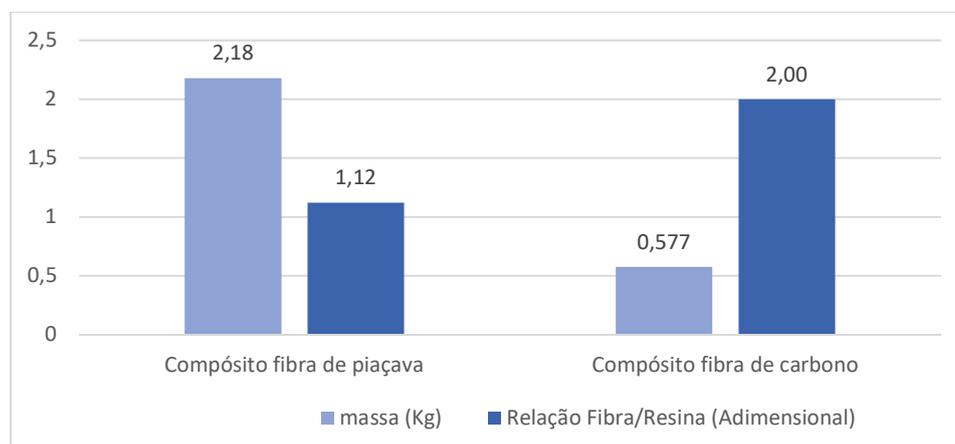
Figura 153: Comparação da relação entre carga máxima e massa dos compósitos



Fonte: Autor, 2019

Ressalte-se a diferença superior a 73% entre a massa do compósito de fibra de piaçava e o de fibra de carbono como demonstra a figura 154.

Figura 154: Comparação da relação entre massa de fibra e resina dos compósitos



Fonte: Autor, 2019

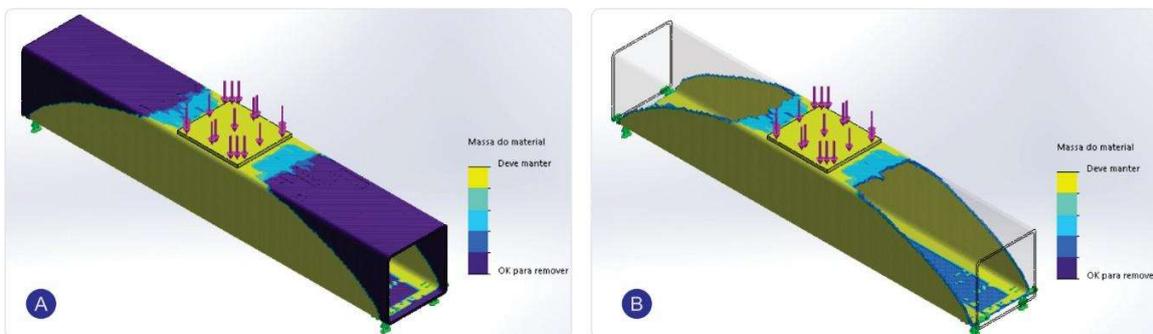
Considerando que o refinamento deste último ciclo de desenvolvimento de projeto se configurará em indicativo para pesquisas futuras somado ao fato de se trabalhar com um

material novo, afirma-se que podem existir adversidades que terão que ser solucionadas durante o processo de projeto.

Isto posto, este trabalho concorda com Yuan (2016) que ao discutir sua teoria de regionalismo paramétrico (capítulo 4) e combinar técnicas de fabricação digital com métodos locais de construção com concreto, afirmou que, após a conclusão da obra, foram encontrados “muitos defeitos na superfície do material devido ao processo de construção manual utilizado” (YUAN, 2016, P. 96). Isto demonstra que trabalhar com novos materiais pode gerar algumas dificuldades, mas que, com tempo e experiência, estas são passíveis de serem solucionadas.

Outro aspecto que deve ser ressaltado é que com o resultado do IPT inseridos na simulação do SolidWorks 2018, também teria sido possível perceber que o melhor seria não fabricar a estrutura com os orifícios centrais (figura 155), visto que aparecem como solicitadas.

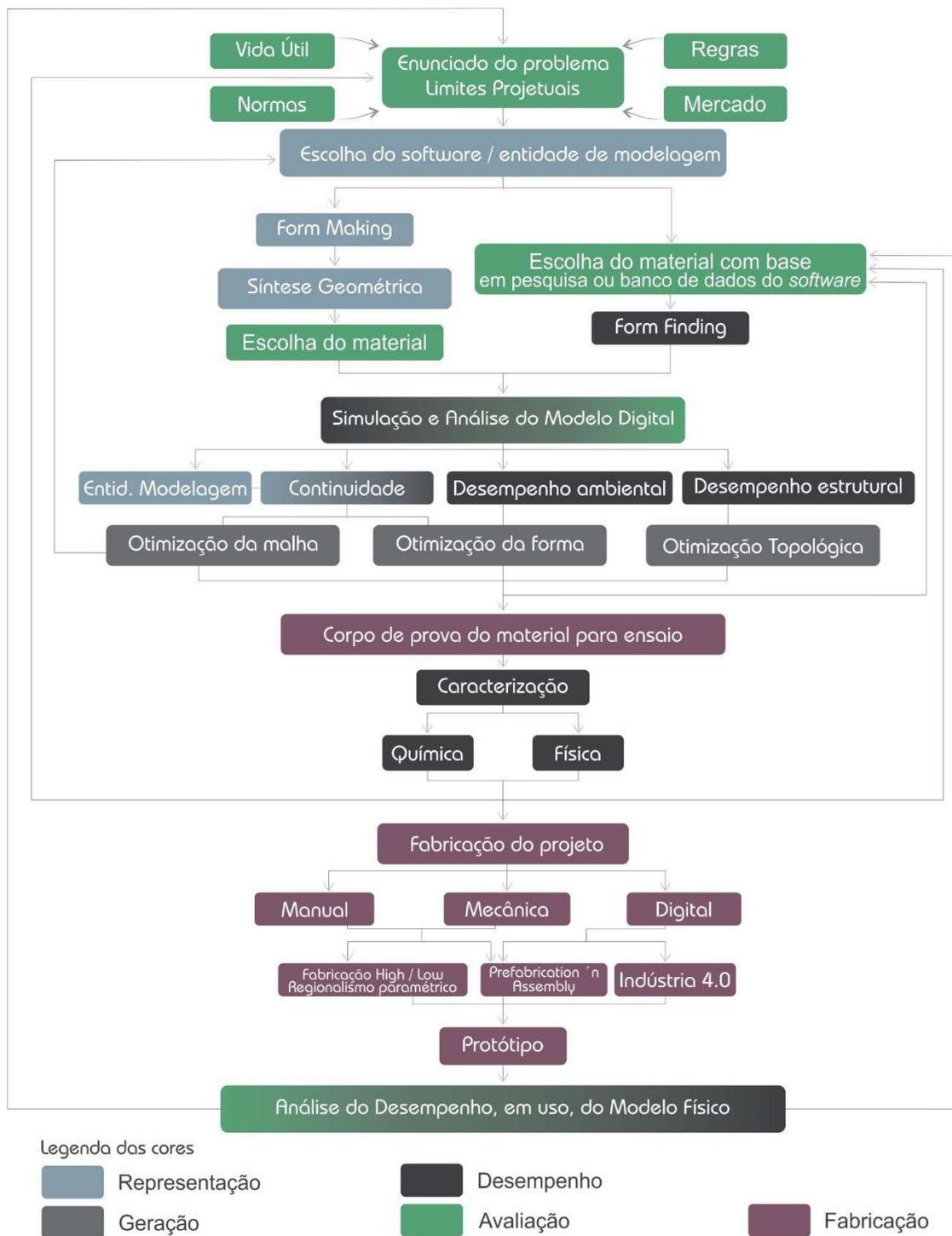
Figura 155: Simulação da estrutura após resultados de ensaio de tração



Fonte: Autor, 2019

Como resultado de todas as investigações realizadas pela presente pesquisa, foi possível propor um ciclo de desenvolvimento do projeto, generalista, com mediação digital e no qual, a escolha e caracterização dos materiais entre já nas fases iniciais, conforme demonstra figura 156.

Figura 156: Ciclo de desenvolvimento do projeto proposto pela pesquisa



O ciclo do desenvolvimento do projeto apresentado na figura 156 ilustra também, de acordo com as definições de Oxman (2006), em qual fase do processo de projeto se encontra cada etapa trilhada. Nota-se que alguns procedimentos podem possuir duas cores, em virtude de relação com duas das definições, propostas pela autora supracitada. Um exemplo deste caso é a fase de simulação e análise do modelo digital (que se faz referência ao desempenho, faz também à análise).

Durante as investigações realizadas pode-se notar que a avaliação do desempenho do material, já nas fases iniciais do processo de projeto, viabiliza um ciclo de desenvolvimento mais preciso e enxuto. Demonstrando a importância do estudo científico desta temática.

Neste ciclo proposto, tanto o desempenho material como a fabricação são importantes componentes do processo, visto que neles podem ser feitas análises que são condicionantes do ato projetivo. Isto posto, a presente pesquisa defende os assuntos por ela abordados como campos de estudos que devem ser reforçados no ensino e prática arquitetônica. Principalmente quando se constrói com novos materiais compósitos, uma vez que estes possuem procedimentos específicos de fabricação que precisam ser descritos, ilustrado, elucidados, e simplificados para que seja possível produzir arquitetura paramétrica e/ou algorítmica num contexto local.

Por último, ressalta-se que a criação deste ciclo de desenvolvimento de projeto não busca finalizar a discussão sobre a temática, nem mesmo ser apontado como único caminho possível da área; entretanto, este fluxo aponta vertentes para pesquisas futuras, principalmente no que tange o refinamento do processo, bem como adequação dele ao quarto paradigma de produção da indústria.

*Parametrics is more about an attitude of mind than any particular software application. [...] It is a way of thinking that some designers may find alien, but the first requirement is an attitude of mind that seeks to express and explore relationships.*

*Robert Woodbury*

## **Capítulo 7 – Crítica à razão projetiva**

Este capítulo procura apresentar e discutir alguns questionamentos que surgiram ao longo da pesquisa. Deste modo, pedimos permissão ao leitor para deixar a impessoalidade da escrita, parâmetro tão relevante à ciência, uma vez que é visto como *conditio sine qua non* para que um trabalho seja visto como científico e sem interferências pessoais. Esta transição faz-se necessária para deixar evidente que os posicionamentos, aqui apresentados, são oriundos de análises reflexivas baseadas na percepção do próprio autor após as experiências relatadas anteriormente.

Isto posto, o primeiro questionamento apareceu durante a apresentação de um artigo sobre arquitetura algorítmica e modelos de representação no 5º seminário Ibero-Americano de Arquitetura e Documentação, onde o mediador da mesa perguntou:

### **7.1 Os processos digitais de projeto, como o AAD, desmerecem os processos clássicos, como os que se iniciam pelo croqui?**

Esta talvez seja uma pergunta que pode causar um clima tenso na área, mas que trata-se de um questionamento cuja resposta não me gera dúvidas: De modo algum, os processos de projeto que se iniciam por croqui, continuarão tendo suas qualidades e provavelmente não deixarão de existir, a rapidez e facilidade deste tipo de metodologia são o que sustentam esta hipótese.

O que, sim, podemos dizer é que são dois processos projetivos distintos que englobam lógicas de raciocínios diferentes: o croqui trabalha com lógica aditiva (primitivas gráficas são adicionadas e possuem significados baseados em acordo social), ao passo que os processos digitais de projeto, especificamente os com algoritmos e os que trabalham com modeladores sólidos, utilizam lógica associativa (onde cada primitiva ou entidade de modelagem é capaz de carregar informação durante o ato de representação/geração, esta informação pode ser intrínseca do material ou oriunda de simulação), conforme apontamentos já explorados nos capítulos 2 e 3.

Assim, as relações projetivas que embasam a forma deveriam se tornar cada vez mais explícitas para o arquiteto. Ainda neste tocante, durante as disciplinas de estruturas ministradas nos cursos de Arquitetura e Urbanismo e Engenharia Civil pelas universidades nas quais fui professor, eu costumava dizer que era preciso dominar os porquês do ato projetivo. Leia-se, agora, após quatro anos de doutorado, que é preciso tornar explícitas as relações, que deveriam ser cada vez mais associativas, do pensamento projetivo.

Isto me faz lembrar também outra provocação apresentada a meus alunos: se o ato projetivo, para quem projeta, é algo fácil (na hipótese de não haver relações associativas na gênese de sua arquitetura); então isto pode ser um indicativo de uma arquitetura com pouco embasamento técnico.

Estas provocações eram realizadas porque, na minha ótica de professor e de eterno aprendiz, o ato projetivo deve possuir relações cada vez mais interconectadas (lógica associativa) entre as diversas relações durante o processo de projeto. *E.g.*: a escolha da espessura e do revestimento da parede deveriam relacionar-se com a norma de desempenho e o quociente global de transmissão térmica que compõe esta parede hipotética.

Ou, ainda, a escolha da forma deveria estar intimamente associada à resistência dos materiais, visto que, como demonstrado nesta tese, o processo projetivo onde a definição e caracterização dos mesmos encontra-se nas fases iniciais, possibilita morfologias que possuem melhor distribuição de tensões atuantes na superfície, menor deformação

máxima e energia elástica de deformação, quando comparado com metodologias de projeto de *form-making*. Assim, para fabricar estas formas otimizadas, seria necessária uma menor quantidade de material.

Outro fato relevante, a discussão sobre o modo como construir aquilo que é idealizado pela intensão projetiva é um dos aspectos que emerge desta arquitetura digitalmente mediada, visto que o próprio processo digital de projeto solicita ao arquiteto que ele construa os dispositivos mediadores que irão auxiliar a fabricação local com mão de obra não especializada.

Quando se fala em indústria 4.0, o diálogo entre as áreas de projeto e de engenharia precisa ser cada vez mais próximo e efetivo, uma vez que através do conhecimento das propriedades intrínsecas das primitivas gráficas e entidades de modelagem, o projetista é capaz de conceber projetos com possibilidade geométrica ilimitada. Projetos estes que em virtude do conhecimento destas entidades, são capazes de catalisar diretrizes projetuais (as vezes não evidentes para o usuário comum).

Os processos de desenvolvimento do produto, nestas indústrias, já englobam as fases pesquisadas neste trabalho, passando por caracterização dos materiais, simulação, protótipos, validação etc. A arquitetura, por conta da quantidade e complexidade dos agentes e variáveis envolvidas, ainda tem um longo caminho a percorrer. Entretanto, resta claro que é preciso que o arquiteto se aproxime de todas as fases constituintes do ciclo de desenvolvimento do projeto.

Isto posto, a segunda pergunta surgiu de um diálogo com amigos, professores da área de projeto e de representação. Tal questionamento realmente me fez pensar durante longos meses. Acredito que a resposta veio acompanhada da própria pesquisa, a medida que fui finalizando a discussão, acabei por compreender melhor a resposta para a indagação:

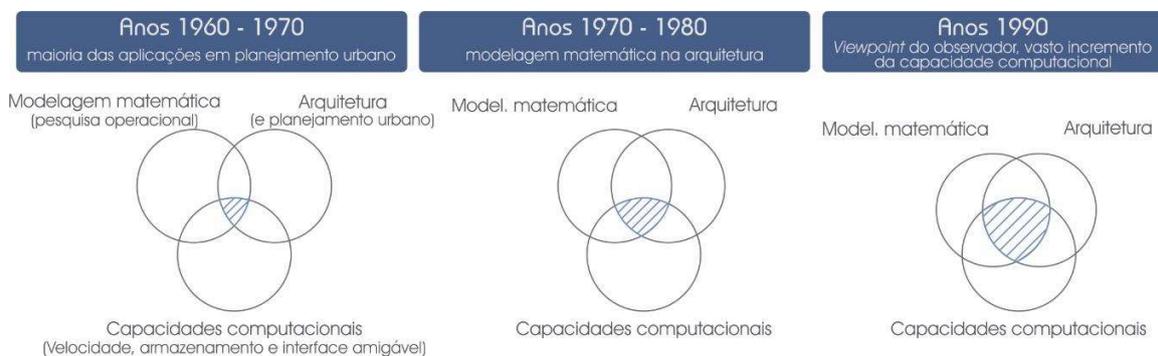
## 7.2 Os arquitetos devem ser programadores no futuro?

Para responder tal questionamento é preciso perceber que a programação, ou projeto assistido por algoritmo, tem se tornado mais presente em escritórios de arquitetura devido a ferramentas como o Grasshopper e Dynamo (editores gráficos de algoritmos). Isto porque foram eles que ampliaram para o público as possibilidades representacionais e construtivas de formas não convencionais. Estas morfologias puderam ser geradas não por lógica aditiva (primitivas gráficas), mas sim por associativa, através de uma série de regras explícitas em uma estrutura e linguagem de computador que se baseiam em algoritmos, conforme apontamentos de Henrique e Bueno (2010).

Isto posto, por dedução é possível perceber que quem conhece e domina programação é capaz de transpor as limitações dos *softwares* convencionais e, assim, produzir suas próprias definições computacionais (*scripts*) para arquiteturas que possuem geometrias complexas. Estas geometrias muitas vezes são construídas através de raciocínios matemáticos e este é um dos motivos que demonstram como o conhecimento da matemática subjacente à forma facilita o raciocínio projetivo em processos de AAD.

Sobre o potencial da modelagem matemática na arquitetura e no urbanismo, Binnekamp, Van Gunsteren e Van Loon (2006) afirmaram que, com o passar dos anos, houve um aumento do seu potencial, como pode ser observado na figura 157.

Figura 157 – Aumento do potencial da modelagem matemática na arquitetura e no urbanismo ao longo dos anos



Fonte: Binnekamp, Van Gunsteren e Van Loon, 2006.

Este tipo de abordagem projetiva, que utiliza a matemática subjacente à forma, é uma competência comum às pessoas que Binkey, Jeffries e Vola (2015) definiram como “*algorithmic people*”. Para eles o termo define uma nova geração de engenheiros capazes de combinar, por meio de uma abordagem digitalmente mediada, a intuição projetiva com a tectônica da construção (os atos físicos que englobam o ato de construir).

Mesmo que Binkey, Jeffries e Vola (2015) tenham restringido a definição para o ofício do engenheiro, existem outros autores, já apresentados nesta pesquisa, que não delimitam o algoritmo como um segmento de trabalho exclusivo desta área. De fato, esta pesquisa apresentou diversos indícios do benefício mútuo resultante da cooperação entre arquitetura e engenharia. Como exemplo é possível citar o Novo Estruturalismo, visto que este nasce justamente da união e do diálogo entre às profissões supracitadas, conforme afirmaram Rivka Oxman e Robert Oxman (2010).

Outro fato relevante que deve ser apontado para que se construa a contextualização necessária ao presente questionamento é que, nos processos que utilizam AAD, o algoritmo precisa necessariamente trazer à tona (definir) aspectos intrínsecos à tectônica, como é o caso da estruturação de uma arquitetura não convencional.

Como ainda existem, no Brasil, diversas escolas de arquitetura e urbanismo que não questionam as metodologias convencionais de projeto e de fabricação e pouco incentivam os alunos a investigarem formas não euclidianas, nota-se que a presente pergunta, ainda não respondida, engloba outro questionamento implícito:

#### **No futuro, o ensino da arquitetura e do urbanismo deve mudar?**

Se levarmos em consideração tudo o que foi exposto e entendermos que a ponta da discussão dos processos digitais de projeto, na atualidade, muito se relaciona com a programação de algoritmos; sim, acredito que o ensino de arquitetura do futuro necessariamente deve passar pela aprendizagem de programação aplicada à arquitetura e ao urbanismo. Importante ressaltar, entretanto, que os arquitetos não necessariamente deverão ser programadores, isto porque há diversos campos de trabalho na arquitetura que não envolvem algoritmos (ainda).

O ensino de arquitetura deve mudar para que as discussões acerca dos assuntos abordados neste trabalho, e principalmente os que se relacionam com arquitetura algorítmica, possam fazer parte do repertório dos acadêmicos de arquitetura. Entretanto, a decisão de se aprofundar nos estudos e na prática de AAD, e o próprio fato de se tornarem ou não programadores, são respostas que virão de fórum íntimo de cada profissional.

Um aspecto positivo nas mudanças que já ocorrem no ofício arquitetônico e que se relacionam com as perguntas aqui pontuadas é o fato, já postulado, de que o Grasshopper (utilizado no Rhinoceros) e o Dynamo (*plug-in* do Revit) são exemplos de editores gráficos de algoritmos. Isto posto, quem já pesquisa e/ou trabalha com estes editores (o número vem aumentando gradativamente), consciente ou inconscientemente trabalha com programação.

Woodbury (2010, p. 9) apresentou posicionamento semelhante a este quando afirmou que “quase todos aqueles que trabalham com modelagem paramétrica são programadores amadores”. Assim, no que tange o AAD, é possível afirmar que quanto maior o grau de conhecimento em programação maior será a liberdade formal e facilidade de desenvolvimento de tarefas nestes editores gráficos de algoritmos.

Como desdobramento disto é possível comprovar que os *plug-ins* Grasshopper e Dynamo são exemplos práticos que comprovam que a programação pode acontecer dentro de uma interface amigável e intuitiva para arquitetos e urbanistas. Isto porque um usuário com nenhum conhecimento em algoritmos é capaz de desenvolver, depois de poucas explicações, suas investigações projetivas nestes *plug-ins* supracitados.

Isto posto, uma vez que o que se postula que é a interação entre o computador e o arquiteto, que precisa mudar para que se efetive a utilização de processos digitais de projeto, é admissível entender que esta mudança deve vir através de um ensino e quadro teórico que viabilizem uma maior participação dos alunos no ciclo de desenvolvimento do projeto, para que deste modo eles possam discutir, definir e implementar no computador os mecanismos de estruturação, bem como os fluxos de procedimentos projetivos digitalmente mediados, capazes de gerar suas geometrias não convencionais.

Kotnik (2010) já apontava a ausência de um quadro teórico que pudesse definir uma agenda pedagógica abrangente o bastante para ensinar os processos digitais de projeto nas escolas de arquitetura, raciocínio compartilhado por Alves (2014) e Alves e Trujillo (2015). Para Oxman (2006, p. 230) “os processos digitais de projeto e seus crescentes impactos sobre as práticas de projeto e produção, estão sugerindo a necessidade de um reexame das teorias e metodologias atuais, no sentido de explicar e orientar futuras pesquisas e desenvolvimentos”.

Corroborando este raciocínio de mudança no ensino de arquitetura, Celani (2018) defende a hipótese de que seria possível, a médio e longo prazo, um real avanço da arquitetura brasileira e uma participação mais ativa dos arquitetos nacionais junto às discussões internacionais, bem como uma retomada da liderança (outrora existente)<sup>110</sup>; isto estaria atrelado segundo a autora à implementação de uma formação mais arrojada para os acadêmicos.

Obviamente, não fica claro se a autora defende o ensino de programação aplicada à arquitetura e urbanismo, mas é evidente a defesa de uma formação diferente da atual para os futuros arquitetos e urbanistas do país.

Para Dickinson (2018), grande parte das escolas de arquitetura ainda utilizam o modelo da *École des Beaux Arts*, além do fato de que o próprio imaginário coletivo da profissão, ainda passa pela figura clássica de uma pessoa projetando atrás de uma prancheta, com ferramentas analógicas. Por outro lado, o autor defende que a revolução tecnológica mudou radicalmente o modo como funciona a carreira na arquitetura e no urbanismo.

Para Dickinson (2018, p. 1) “os sistemas de entrega dos projetos de edifícios estão mudando em uma velocidade mais rápida do que a capacidade da acadêmica em criar uma pedagogia capaz de ensiná-los” (tradução nossa).

---

<sup>110</sup> Celani (2018) se refere neste ponto à arquitetura e o urbanismo Brasileiro do século XX, momento este em que o país era visto como uma nação do futuro por conta da criação de uma cidade planejada do zero (Brasília), da concepção de edifícios nacionais expostos internacionalmente, como obras de arte em museus famosos e, do duplo recebimento da mais nobre premiação da área: o Pritzker, por dois arquitetos brasileiros.

Segundo o autor, alguém letrado em tecnologia tem a capacidade de ensinar os softwares contemporâneos, entretanto “a repercussão das novas tecnologias tem consequências tão recentes e revolucionárias que seu impacto final é incognoscível” (DICKINSON, 2018, p. 2).

É por isso que ele afirma que academia atual não prepara os alunos para o futuro. Para ele o ensino da área precisa abranger o processo de produção/materialização dos projetos arquitetônicos, além de possuir foco no aprendizado de questões do mundo real com resultados também reais.

Bernstein (2018) discordou de Dickinson (2018) quando afirmou que o futuro da profissão é incognoscível, e por isso, seria ilógico sugerir que o ensino atual não está preparando os acadêmicos para lidar com as questões futurísticas.

Para o autor, a melhor maneira de antecipar o futuro é estar pronto para projetá-lo, e é por isso que ele defende que o ensino está preparando os acadêmicos para os problemas vindouros, visto que os arquitetos/designers intelectualmente curiosos, orientados por pesquisas e com conhecimento em processos e fabricação digitais são capazes de utilizar estes conhecimentos nesta época incerta e hipotética.

É preciso ressaltar que a certeza de que a academia está, de fato, preparando os alunos para o futuro da profissão, advém da existência, neste ensino defendido por Dickinson (2018), de metodologias que trabalham todo o ciclo de desenvolvimento do projeto, englobando assim, os processos digitalmente mediados e a fabricação digital e robótica.

Levando em consideração que ainda existem escolas de arquitetura que pouco (ou nada) exploram as competências digitais na formação do aluno, a presente pesquisa concorda com Dickinson (2018) quando este afirma que o modo como funciona a profissão de arquitetura está mudando e, portanto, a forma de ensino terá, também, que mudar; principalmente no tocante aos assuntos que se relacionam com a matemática subjacente à forma, processos digitais de projeto, CAGD e AAD, tectônica digital e programação aplicada à arquitetura e ao urbanismo.

Como exercício hipotético provocativo, e sem compromisso algum com a realidade, é possível propor a época futura em que seria inserido, por força de lei, o algoritmo (ou introdução à programação aplicada à arquitetura) como disciplina paradigmática de representação para os discentes brasileiros. Para isto é preciso colher alguns fatos históricos como base de extrapolação e, assim, encontrar o ano hipotético da implementação do ensino de AAD por força de lei.

Isto posto, a começar pelo advento da computação (1936) através da máquina de Turing e a portaria do MEC nº 1770/94 (1994) que obrigaria o ensino de informática aplicada à arquitetura e urbanismo no Brasil, têm-se um hiato temporal de exatos 58 anos.

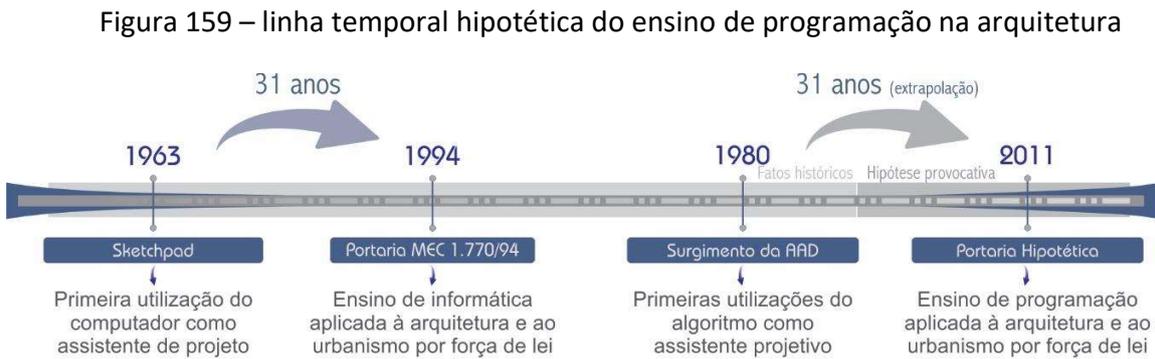
Utilizando este tempo (58 anos) e tomando como base o ano de 1980 que foi época em que os algoritmos passaram a ser investigados como assistente de projeção, é possível estabelecer, em grau puramente hipotético, o ano de 2038 como o momento em que, talvez seria ensinado, por força de lei, algoritmos ou programação aplicada à arquitetura e ao urbanismo, conforme figura 158.



Fonte: Autor, 2019.

Este exercício provocativo hipotético pode ser julgado como possuidor de referências bastante diferentes, visto que para utilizar o ensino de programação aplicada à arquitetura e ao urbanismo como fato histórico para extrapolação de dados, o melhor seria utilizar épocas de contagem de tempo que possuem maior semelhança entre si.

Logo, uma análise que talvez pareça mais palpável, deveria utilizar não o advento da máquina de Turing, mas sim a primeira utilização do computador como assistente de projeção, como é o caso de Ivan Sutherland e seu Sketchpad em 1963. Assim, o hiato temporal seria de 31 anos como pode ser observado na figura 159.



Fonte: Autor, 2019.

Como inexistente um documento, com data de 2011 e força de lei, que obrigue o ensino de programação aplicada à arquitetura e ao urbanismo no Brasil, o que se tem com esse exercício provocativo hipotético é apenas uma ideia de quando isto poderia vir a ocorrer. Neste sentido, mais do que adivinhar a data, se é que um dia ela existirá, talvez esta provocação possa servir para fomentar a discussão deste paradigma de representação que vem modificando a forma como os arquitetos se relacionam com o processo de projeto e tectônica digital.

Fischer (2015) pode ter concordado com essa visão de uma mudança no ofício arquitetônico ao afirmar que a prática arquitetônica irá mudar exponencialmente em 2050. O autor discutiu esse assunto em seu texto que aborda o impacto da terceira revolução industrial na arquitetura, e como ela (e as outras que virão) irão guiá-la à uma customização em massa, proporcionada pela própria sociedade, associada à uma forma urbana mais densa e sustentável.

Para o autor os arquitetos deste novo contexto precisarão se tornar projetistas estratégicos e altamente colaborativos além do fato de necessitarem associar ao trabalho qualquer conhecimento que auxilie seus clientes a alcançarem seus objetivos organizacionais.

### **7.3 Crítica ao uso das novas ferramentas digitais**

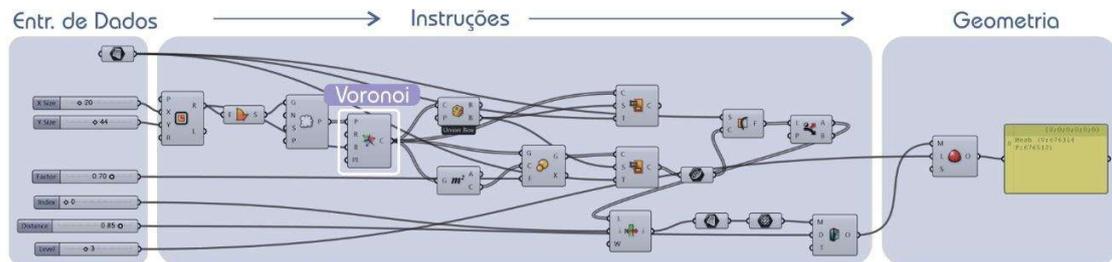
Tedeschi (2014) postulou que no período anterior à revolução digital, o arquiteto dividia os componentes da edificação em partes individuais e estudava estratégias de montagem das partes e do todo, por meio de modelos e desenhos em escala, para gerenciar a complexidade de seus projetos. Segundo o autor, estes modelos eram então transferidos para fornecedores e empreiteiros que buscavam interpretar o projeto, para fabricar os componentes da montagem.

O problema deste raciocínio (bastante em voga ainda na atualidade) é que este processo se limitava às estruturas ortogonais (TEDESCHI, 2014), tendo pouca eficácia com geometrias não convencionais. Para o autor, foi a revolução digital e os processos digitais de projeto que liberaram a arquitetura para explorar as formas não euclidianas, uma vez que integraram projeto e fabricação.

Uma crítica à exploração destas novas arquiteturas proporcionadas pelos processos digitais de projeto foi dada por Parsons (2014) que escreveu que à medida em que as ferramentas digitais se tornassem mais populares e comuns, as formas complexas, fabricáveis em virtude de tais ferramentas, poderiam perder seu status revolucionário de pesquisa de ponta.

Para exemplificar este raciocínio Parsons (2014) citou o algoritmo Voronoi (figura 160), que segundo Wirz (2014) era um algoritmo explorado apenas pelos designers computacionais mais qualificados, entretanto, com o avanço nas pesquisas de CAGD e AAD, este algoritmo acabou se tornando uma ferramenta convencional e acessível à comunidade projetiva.

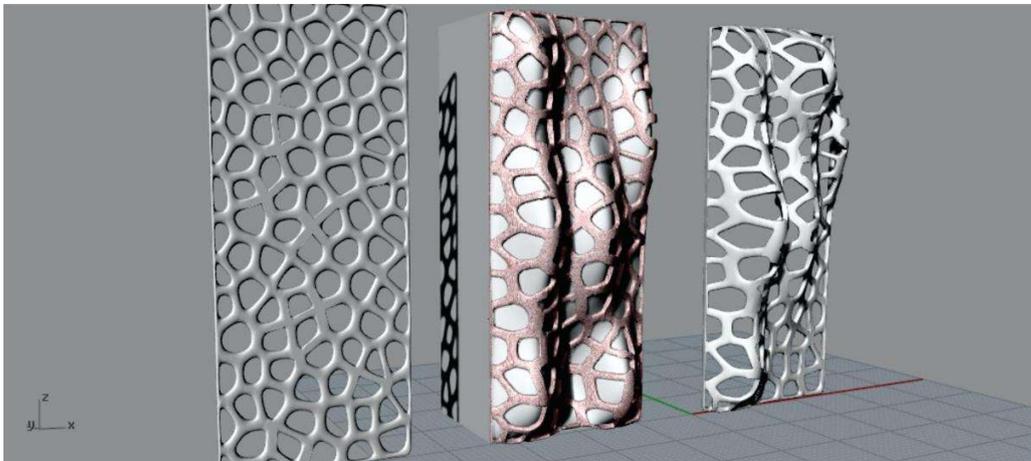
Figura 160 –Voronoi em contexto algoritmo.



Fonte: Autor, 2019.

A crítica ao uso do algoritmo Voronoi, para Parsons (2014), reside no fato de que é possível que haja uma banalização na exploração das formas complexas (figura 161), em virtude da ausência de uma profunda compreensão das propriedades geométricas e/ou implementação inteligente deste algoritmo.

Figura 161 – Exemplos de formas produzidas pelo algoritmo Voronoi



Fonte: Autor, 2019.

Wirz (2014) não apenas concorda com este pensamento, como também afirmou que o uso desta ferramenta digital, sem o devido raciocínio geométrico em seu cerne, seria encarado apenas como a utilização de um algoritmo programado por outra pessoa. Nestes casos, Parsons (2014) foi categórico ao afirmar que não haveria nenhuma habilidade

envolvida no processo e, como acrescentou Wirz (2014), não haveria progresso algum também.

Para o autor, as qualidades espaciais de uma composição morfológica devem estar apoiadas por estratégias construtivas e funcionais significativas. Parsons (2014), complementa o exposto dizendo que, o aumento do acesso às ferramentas computacionais acarreta uma propensão ao uso excessivo destes métodos ou, até mesmo, o seu uso sem a devida consideração em relação à qualidade espacial.

Salingaros (2010) também criticou o que ele chamava de novo projeto algorítmico (*new algorithmic design*). O autor dizia que a arquitetura (originada destes processos) poderia ser entendida como uma busca vazia por formas abstratas e divertidas; o que levaria à uma arquitetura desconexa em relação à escala e às necessidades das pessoas, além de ser irrelevante. Nesta linha de raciocínio, Lawrence Friesen em entrevista concedida à Anne Beaurecueil e Franklin Lee (2009), disse que para controlar os processos digitais de projeto:

[...] os arquitetos precisam desenvolver o algoritmo que alimenta os dados, extraíndo deles, a informação que guiará a geração da forma. Se os arquitetos, apenas utilizarem algoritmos existentes, então, os arquitetos não estarão criando soluções projetuais inteligentes; estarão apenas brincando com metodologias previamente concebidas (BEAURECUEIL; LEE, 2009, p. 42).

Friesen defende que as ferramentas e os processos digitais de projeto estão empoderando e encorajando uma volta da arquitetura à ideia da construção artesanal e ao local onde ocorre o ofício do artesão (que constrói e experimenta novos modos de construir, em seu próprio local de trabalho). Para ele os arquitetos agora podem possuir maior controle sobre ciclo de desenvolvimento do projeto, em todos os níveis.

Tal situação ocorre porque possuem a habilidade de manejar e trabalhar a informação dentro do próprio processo. Neste sentido, o controle computacional possui relação com o fato de se adquirir maior precisão em termos de dados e informações. Assim,

“ao invés de impor uma única solução correta, este controle permite visualizar, criar e compor com uma gama variada de soluções possíveis”. (BEAURECUEIL; LEE, 2009, p. 42).

Talvez seja possível encontrar, nas críticas apresentadas, um modo de conciliar as tensões resultantes da relação entre os processos digitais de projeto, dos quais o modelo paradigmático algorítmico faz parte, e a prática arquitetônica contemporânea.

Nesta conciliação é preciso que os arquitetos alcancem um perfeito equilíbrio entre complexidade e coerência, uma vez que, para Parsons (2014). As ferramentas computacionais podem se desvalorizar através do uso excessivo e, portanto, a responsabilidade de sintetizar múltiplas e complementares fontes de conhecimento de maneira única e inovadora para, por fim, reintroduzir o valor em um projeto, seriam dos arquitetos e, principalmente, dos estudantes de arquitetura (PARSONS, 2014).

Tedeschi (2014) defende que existe uma relação entre a maneira que os projetistas entendem o espaço e as ferramentas que são utilizadas para investigá-lo. Como consequência deste raciocínio, a mente do arquiteto trabalharia em um processo dialético, dinâmico e constante dentro do ato projetivo e criativo. “A influência das ferramentas, entendidas como pesquisas teóricas e, neste caso, como plataformas computacionais, está marcando as experimentações de vanguarda na arquitetura de hoje” (TEDESCHI, 2014, p. 295).

Wirz (2014) defende que o resultado da pesquisa arquitetônica deve ir além de uma imagem esteticamente agradável impressa em uma revista ou livro, e que possui o eventual desejo em ser convertida em realidade, após anos desperdiçados com dinheiro gasto em engenharia reversa.

Para o autor, os processos digitais de projeto podem e devem confrontar a realidade já nas etapas de conceito, e assim antever respostas tanto para desempenho como para critérios funcionais, e assim alcançar soluções que possam superar as limitações da indústria de construção contemporânea. A pesquisa concorda com este raciocínio em sua integridade.

Nesta linha de defesa, Gramazio e Kohler (2008) afirmaram que as abordagens de projetos que são baseadas no desempenho dos materiais enfatizam as estreitas relações entre o desempenho da edificação e as propriedades do material escolhido. Deste modo, quando se toma a pesquisa sobre o material como substância, a exploração morfológica como objetivo, os processos digitais como metodologias e a fabricação digital como técnica, é possível notar a ascensão de um ciclo de desenvolvimento de projeto integrado, desde a modelagem até a produção (GRAMAZIO; KOHLER, 2008).

## Considerações Finais

No que tange a fabricação arquitetônica, esta pesquisa observou que os modelos digitais podem ajudar a romper as fronteiras entre projeto e fabricação, visto que através deles é possível integrar um ciclo de desenvolvimento do projeto que englobe os processos projetivos, os dados advindos do desempenho, a construção e até a própria operação.

Isto posto, também se visualizou neste trabalho o que pontuou Yuan (2016, p. 93) quando afirmou que “o processo digital de projeto tem sido significativamente aperfeiçoado através do pensamento computacional”, pensamento este que, de modo consciente ou não, engloba as ferramentas digitais. Tal raciocínio pôde ser notado através das discussões presentes nos capítulos 3 e 4, além das investigações realizadas durante o desenvolvimento da tese, onde se percebeu que o domínio das entidades de modelagem, e das ferramentas digitais como um todo, permitem uma aproximação efetiva entre a intenção projetual de geometrias não convencionais e a fabricação na arquitetura.

Diante do exposto é possível afirmar que as principais contribuições do trabalho dizem respeito ao ciclo de desenvolvimento de projeto proposto e refinado pela tese, bem como o desenvolvimento dos materiais compósitos poliméricos, principalmente o de fibra natural (piaçava) que demonstrou desempenho estrutural considerável.

Ressalta-se que a metodologia proposta pelo trabalho pode ser aplicada em geometrias planas e também em formas não convencionais. Deste modo, esta tese entende e defende a ciência como um caminho de construção contínua, de forma que o ciclo de desenvolvimento do projeto proposto não é apresentado como o único modo de trabalho que englobe processos digitais de projeto e a fabricação local com materiais compósitos poliméricos, mas sim como um norteador para pesquisas e práticas futuras.

Deste modo, fez-se necessário apontar a necessidade de aperfeiçoamento na metodologia de fabricação do compósito polimérico de fibra de carbono, que encontrou dificuldades construtivas por ser, para esta pesquisa, um material nunca utilizado.

Assim um possível caminho a ser percorrido no futuro é a continuidade na participação nos desafios possibilitados pela SAMPE Brasil, para desenvolver melhores e mais eficazes técnicas de trabalho com ciclos de desenvolvimento de projetos que utilizem fibra de carbono. Tal consideração parte do pressuposto que ao se trabalhar com novos materiais, quando se possui pouco conhecimento na área, podem surgir problemáticas difíceis de serem solucionadas, tanto nas fases de processo, como de produção. Entretanto, como este era um dos focos da pesquisa, as dificuldades oriundas especificamente da falta de conhecimento, não são aqui apontadas como aspectos negativos da pesquisa, mas sim como objetivos a serem superados por estudos futuros.

Especificamente neste ponto, a pesquisa ressalta que na última investigação da tese, a estrutura do compósito polimérico reforçado com fibra de carbono começou a ser investigada também com o software específico para análise de elementos estruturais (Ansys). Este software que também utiliza editor gráfico de algoritmos e programação, apresenta-se como um expoente nas pesquisas relacionadas à análise estrutural. Entretanto, como faltou tempo hábil para aprender e implementar corretamente suas funcionalidades, que são vastas e envolvem desde modelagem à otimização topológica e otimização do *Standard Laminate Code*, optou-se por não o incluir na análise de resultados, mas sim apontar como um caminho futuro de trabalho que esta pesquisa gostaria de desenvolver.

Neste tocante, é preciso apontar as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento da tese, na qual acredita-se que parcerias entre laboratórios de pesquisa, como o IPT, e ações como as possibilitadas pela SAMPE Brasil, são capazes de viabilizar pesquisas de alto valor científico mesmo sem orçamento monetário. Em outras palavras, é possível, mesmo sem dinheiro produzir conhecimento científico na área de processos digitais de projeto e fabricação arquitetônica.

Mesmo considerando os apontamentos supracitados como positivos, é preciso igualmente ressaltar que em pesquisa com cronograma definido, fatos como o atraso na entrega de materiais e/ou envio de materiais diferentes dos especificados, podem dificultar

e até inviabilizar o fazer científico (o que demonstra o paradoxo entre auxílio e cumprimento do prazo realizados pelas empresas parceiras).

Por último, a tese considera que conseguiu atingir integralmente os objetivos que se propôs investigar, visto que comparou processos de projeto de modelos *form-making*, algorítmico e *form-finding*; avaliou o desempenho estrutural de morfologias oriundas de processos digitais de projeto; produziu um material compósito polimérico com fibra natural e resina epóxi (validando seu desempenho estrutural); construiu curvaturas de continuidade  $C^2$  e, por último, conseguiu generalizar, com base nos exemplos investigados, um ciclo de desenvolvimento de projeto, que permeava a fabricação com materiais compósitos de morfologias oriundas de processos digitais de projeto.

## Referências Bibliográficas

- ABMACO — ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS COMPÓSITOS. **Compósitos I: Materiais, Processos, Aplicações, Desempenho e Tendências**. São Paulo, 2008.
- ABREU, L. A. S. **Abordagem bayesiana para identificação de falhas em compósitos laminados através da transferência de calor**. 2011. 156 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro. 2011.
- ALBINO, V.; BERARDI, U.; DANGELICO, R. M. *Smart Cities: Definitions, Dimensions and Performance*. Journal of Urban Technology, **V. 22, nº 1**. Fev. Pags. 3 – 21. S/l: s/e, 2015. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/656e/4fb0564d96407161d9e541a9ca15375d6c60.pdf>. Acesso em: 09 Jan. 2019.
- ALVES, G. Cibersemiótica e Processos de Projeto: **Metodologia em Revisão**. 2014. 303 f. Tese (doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – USP, São Carlos. 2014.
- ALVES, G.; TRUJILLO, J. Processos digitais de projeto: mudança de paradigma no ensino da Arquitetura e Urbanismo. In: VII Projetar – Originalidade, criatividade e inovação no projeto contemporâneo: Ensino, pesquisa e prática, VII, Natal, **Anais**, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/282324761\\_Processos\\_digitais\\_de\\_projeto\\_mudanca\\_de\\_paradigma\\_no\\_ensino\\_da\\_Arquitetura\\_e\\_Urbanismo\\_Digital\\_design\\_paradigm\\_change\\_in\\_the\\_teaching\\_of\\_Architecture\\_and\\_Urbanism\\_Procesos\\_digitales\\_de\\_diseno\\_cambio\\_](https://www.researchgate.net/publication/282324761_Processos_digitais_de_projeto_mudanca_de_paradigma_no_ensino_da_Arquitetura_e_Urbanismo_Digital_design_paradigm_change_in_the_teaching_of_Architecture_and_Urbanism_Procesos_digitales_de_diseno_cambio_). Acesso em: 29 Dez. 2018.
- ANDIA, A.; SPIEGELHALTER, T. (Orgs.). **Post Parametric Automation in Design and Construction**. EUA: Artech House, 2015.
- AMARAL, C. S. O Ensino do projeto nos cursos de arquitetura. In: Vitruvius, **Arquitextos**, **101.05, ano 09**. Out. 2008. Disponível em: [www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/09.101/104](http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/09.101/104). Acesso em: 05 Abril 2018.
- AMARAL, I.; CHUPIN, J. P. Quase tudo que você queria saber sobre tectônica, mas tinha vergonha de perguntar. **Revista Pós**, Vol. 16, nº 26. São Paulo: Edusp, 2009.
- ANDIA, A.; SPIEGELHALTER, T. (Orgs.). **Post Parametric Automation in Design and Construction**. EUA: Artech House, 2015.
- ANDRADE, J. J. O. Propriedade dos Polímeros. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Ipsis Gráfica e Editora, 2010.
- ARAÚJO, A. L. Autômatos celulares: Definição e aplicações na arquitetura. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M. (Orgs.). **Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão**. São Paulo: ProBooks, 2018. P. 68 a 84.

- ARMERO, R. A. *Geometría, técnica y arquitectura*. In: BLASCO, B. (Ed.). **Tectônica: Geometrías Complejas**. Nº17. Madrid: ATC Ediciones S. L., 2004.
- ASHTON, K. Kevin Ashton – **entrevista exclusiva com o criador do termo “Internet das Coisas”**. São Paulo: S/e, 2015. Disponível em: <http://finep.gov.br/noticias/todas-noticias/4446-kevin-ashton-entrevista-exclusiva-com-o-criador-do-termo-internet-das-coisas>. Acesso em: 10 Dez. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13575**: Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-3**: iluminação natural – Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- AUDI, R. (ed.). **The Cambridge dictionary of philosophy**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- BALAGUER, C.; ABDERRAHIM, M. **Robotics and Automation in Construction**. S/l: In Tech, 2008.
- BARROS, G.; SAKURAI, T. **Os enfoques racional e reflexivo e sua relação com a gestão de projeto em arquitetura**. In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção, XVI, São Paulo, **Anais**, 2016
- BAYAZIT, N. *Investigating design: a review of forty years of design research*. In: **Design Issues**. V. 20, n 1, p. 16-29. S/l: S/e, Jan. 2004.
- BEAURECUEIL, A. S.; LEE, F. *Articulated Grounds: Mediating Environment and Culture*. In: **Architectural Association Agendas**, nº7. Londres: AA Print Studio, 2009.
- BENDSOE, M. P. **Optimization of Structural Topology, Shape, and Material**. Berlim: Springer Verlag, 1995.
- BENDSOE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology optimization: theory, methods, and applications**. Berlim: Springer Verlag, 2003.
- BENEVOLO, L. **História das cidades**. Roma: Editora Perspectiva S.A., 1997.
- BERNSTEIN, P. *Architectural education is changing: Let’s hope the profession can keep up*. In: CommonEdge. **Opinion**. **01.22.2018**. S/l: s/e, 2018. Disponível em: <http://commonedge.org/architectural-education-is-changing-lets-hope-the-profession-can-keep-up/>. Acesso em: 23 Fev. 2019.
- BÉZIER, P. **Curvas e Superfícies em CAD/CAM/CAE**. São Paulo: Editora Aleph, 1988.
- BICCA, P. **Arquiteto a máscara e a face**. São Paulo: Projeto Editores Associados, 1984.

- BINNEKAMP, R.; VAN GUNSTEREN, L. A.; VAN LOON, P. ***Open Design, a Stakeholder-oriented Approach in Architecture, Urban Planning, and Project Management***. Holanda: IOS Press, 2006.
- BINKLEY, C.; JEFFRIES, P.; VOLA, M. *Design Computing at Arup*. In: ANDIA, A.; SPIEGELHALTER, T. (Orgs.). ***Post Parametric Automation in Design and Construction***. EUA: Artech House, 2015. P. 113 a 119.
- BOCK, T.; LINNER, T. *Site Automation: Automated/Robotic On-site Factories*. New York, NY: Cambridge University Press, 2016.
- BORDONE, M. G. M. (Ed.) *Archaeology of digital*. In: ***Domus, 13/12***. Milão: EditorialiDomus, Dez. 2014. Disponível em: [www.domusweb.it/en/news/2014/12/13/archaeology\\_of\\_the\\_digital\\_media\\_and\\_machines.html](http://www.domusweb.it/en/news/2014/12/13/archaeology_of_the_digital_media_and_machines.html). Acesso em: 16 Ago. 2018.
- BREEN, J. *Design Driven Research*. In: DE JONG, T. M.; VAN DER VOORDT, D. J. M. (Eds.) ***Ways to study and research urban, architectural and technical design***. Holanda: A-D Druk, 2002. Disponível em: [https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/WTS\\_Preface\\_and\\_Introduction.pdf](https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/WTS_Preface_and_Introduction.pdf). Acesso em: 30 Fev. 2018.
- BROADBENT, G. ***Diseño arquitectónico: Arquitectura y Ciencias Humanas***. Barcelona: Gustavo Gili, 1982.
- BROADBENT, G.; WARD, A. (ed.). ***Metodología del diseño arquitectónico***. Barcelona: Gustavo Gili, 1971.
- BROWN, T. ***Design Thinking: uma metodologia ponderosa para decretar o fim das velhas ideias***. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- BRUSCATO, U. M.; BRENDLER, C. F.; VIARO, F. S.; TEIXEIRA, F. G.; SILVA, R. P. Uso da fabricação digital e prototipagem no desenvolvimento do projeto do produto: Análises do produto através de simulações digitais. In: Blucher Design Proceedings. Vol. **1(7)**. Chile: S/e, 2014. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br/s3-sa-east-1.amazonaws.com/designproceedings/sigradi2013/0088.pdf>. Acesso em: 18 Jan. 2019.
- BRUSSI, M. T. C. E. ***O Design Thinking como metodologia no processo de escolha e uso dos instrumentos de Comunicação Organizacional***. 2014. 87 f. Monografia (Bacharelado em comunicação social com habilitação em comunicação organizacional) – Curso de Comunicação Social - Universidade de Brasília – UNB, Brasília. 2014.
- BUCHANAN, R. *Wicked problems in design thinking*. In: MARGOLIN, V. e BUCHANAN, R. ***The idea of design: A design issues reader***. Cambridge: MIT Press, 1996.
- CACHE, B. *Objectile: The pursuit of philosophy by others means*. In: PERRELLA, S. ***Hypersurface Architecture II. Architectural Design***. Vol 69, nº9-10, ed. 1999
- CAMEROTA, F. *Renaissance Descriptive Geometry: The Codification of Drawing Methods*. In: *Picturing Machines: 1400–1700*, Wolfgang Lefevre (ed.). Cambridge, MA: MIT Press, 2004.

- CARNEIRO, I. B. **O plano Cerdà: A nova Barcelona proposta por Cerdà**. S/l: S/l, 2007. Disponível em: [http://planocerda.com/2007/05/o-plano-cerd-nova-barcelona-proposta\\_29.html](http://planocerda.com/2007/05/o-plano-cerd-nova-barcelona-proposta_29.html). Acesso em: 28 Ago. 2018.
- CARPO, M. **The Making of the Typographical Architect**. New Haven, CT: Yale University Press, 1998.
- CARPO, M. **The Alphabet and the Algorithm**. Cambridge: MIT Press, 2011.
- CELANI, M. G. C. Recuperando o tempo perdido: porque recusamos o método e como ele ainda poderia nos ajudar. In: I Seminário Nacional sobre Ensino e Pesquisa em Projeto de Arquitetura, 7 – 10 Out. 2003. Natal, RN. **Anais do PROJETA 2003**. Natal, RN: PPGAU-UFRN, 2003 p. 8.
- CELANI, M. G. C. *Generative design in architecture: history and applications*. In: *International Architecture Conference New Strategies, Contemporary Techniques*, nº.13, 2008, Barcelona. **Proceedings...** ESARQ, UIC, 2008.
- CELANI, M. G. C. *Algorithmic Sustainable Design: Uma visão crítica do projeto generativo*. In: **Vitruvius**, 116.03. ago. 2011.
- CELANI, M. G. C. Uma nova era para a Arquitetura. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M. (Orgs.). *Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão*. São Paulo: ProBooks, 2018. P. 17 a 20.
- CELANI, M. G. C.; FRAJNDLICH, R. U. C. *From prototypical to prototyping: mass-customization versus 20th century utopias in architecture and urban design*. In: **PARC Research in Architecture and Building Construction**, [S.l.], v. 7, n. 3, p. 160-169, oct. 2016. Disponível em: <http://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8647348>. Acesso em: 27 Ago. 2018.
- CELANI, M. G. C.; PICCOLI, V. *The roles of a model*. In: **Arquiteturarevista**. Vol. 6, nº 1, págs. 50 – 62. Jan. a Jun. de 2010.
- CELANI, M. G. C.; CYPRIANO, D.; DE GODOI, G.; VAZ, C. E. V. A gramática da forma como metodologia de análise e síntese em arquitetura. In: **Conexão – Comunicação e Cultura**. V. 5, n. 10. Caxias do Sul: UCS, 2006.
- COUTINHO, K. D. **Método de otimização topológica em estruturas tridimensionais**. 2006. 109 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2006.
- CROSS, N. (ed.). **Developments in design methodology**. Chichester: John Wiley & Sons, 1984.
- DEBOOR, C. **A Practical guide to Splines**. New York: Springer-Verlag, 1978.
- DE JONG, T. M.; VAN DER VOORDT, D. J. M. (Eds.) **Ways to study and research urban, architectural and technical design**. Holanda: A-D Druk, 2002. Disponível em: [https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/WTS\\_Preface\\_and\\_Introduction.pdf](https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/WTS_Preface_and_Introduction.pdf). Acesso em: 30 Fev. 2018.

- DE JONG, T. M.; VAN DUIN, L. *Design research*. In: DE JONG, T. M.; VAN DER VOORDT, D. J. M. (Eds.) **Ways to study and research urban, architectural and technical design**. Holanda: A-D Druk, 2002. Disponível em: [https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/WTS\\_Preface\\_and\\_Introduction.pdf](https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/WTS_Preface_and_Introduction.pdf). Acesso em: 30 Fev. 2018.
- DICKINSON, D. *Architectural education will have to change or risk becoming irrelevant*. In: CommonEdge. **Opinion**. **01.04.2018**. S/l: s/e, 2018. Disponível em: <http://commonedge.org/architectural-education-will-have-to-change-or-risk-becoming-irrelevant/>. Acesso em: 23 Fev. 2019.
- DORST, K. *Describing Design: A comparison of paradigms*. Tese (Doctorate in Industrial Design Engineering) – Technische Universiteit Delft, Netherlands: Technische Universiteit Delft, 1997.
- ECO, U. Abertura, Informação, Comunicação. In: **Coleção Debates: Estética**, 4. São Paulo: Perspectiva, 1997.
- EKERN, M. *Photo of winton guest house*. In: WINTERER, J. *Frank Gehry's Winton Guest House Has a New Owner*. In: *Academic news +*, **Maio 19**. Minnessota: *Newsroom*, 2015. Disponível em: <https://news.stthomas.edu/frank-gehrys-winton-guest-house-new-owner-today/>. Acesso em: 22 Ago. 2018.
- ENGEL, H. **Sistemas Estruturais**. Barcelona, Espanha: Editorial Gustavo Gili, 2014.
- EVAN, D. A internet das coisas: **Como a próxima evolução da internet está mudando tudo**. S/l: Cisco Internet Business Solutions Group, 2011. Disponível em: [https://www.cisco.com/c/dam/global/pt\\_br/assets/executives/pdf/internet\\_of\\_things\\_iot\\_ibsg\\_0411final.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/global/pt_br/assets/executives/pdf/internet_of_things_iot_ibsg_0411final.pdf). Acesso em: 12 Dez. 2018.
- FACRALOSSO, I. Clássicos da Arquitetura: **Casa Dymaxion 4D / Buckminster Fuller**. In: ArchDayily Brasil, 23 Mai. 2013. S/l: S/e, 2013. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/01-130267/classicos-da-arquitetura-casa-dymaxion-4d-slash-buckminster-fuller>. Acesso em: 29 Ago 2018.
- FARIN, G. **Curves and Surfaces for computer aided geometric design: A practical guide**. Tempe, Arizona: Academic Press, 1996.
- FARIN, G. *A History of Curves and Surfaces in CAGD*. In: Farin, G. e HOSCHEK, J. M.-S. K. (eds) **Handbook of Computer Aided Geometric Design**. Amsterdam: Elsevier, 2002. Disponível em: <http://www.farinhansford.com/gerald/papers/history.pdf>. Acesso em: 20 Fev. 2018.
- FASOULAKI, E. **Integrated Design: a generative multi-performative design approach**. Dissertação (mestrado) – Massachusetts Institute of Technology - MIT, Massachusetts, EUA. 2008.
- FERREIRA, A. A.; REIS, A. C. F.; PEREIRA, M. I. *Gestão empresarial: de Taylor aos nossos dias: evolução e tendências da moderna administração de empresas*. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

- FISCHER, T. *Welcome to the Third Industrial Revolution: The Mass-Customisation of Architecture, Practice and Education*. In **Architectural Design**, Vol. **85**, issue **4**. s/l: s/e, Jul./Ago. 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/ad.1923>. Acesso em: 12 Set. 2018.
- FLORIO, W. Modelagem paramétrica, criatividade e projeto: Duas experiências com estudantes de arquitetura. In: **Gestão & Tecnologias de Projetos**. **6(2)**, 43-66. S/l: USP, 2011. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/51010>. Acesso em: 10 Jan. 2019.
- FRAMPTON, K. **Studies in tectonic culture**. Cambridge (MA): MIT Press, 1995.
- FOKKEMA, J. *Preface*. In: DE JONG, T. M.; VAN DER VOORDT, D. J. M. (Eds.) **Ways to study and research urban, architectural and technical design**. Holanda: A-D Druk, 2002. Disponível em: [https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/WTS\\_Preface\\_and\\_Introduction.pdf](https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/WTS_Preface_and_Introduction.pdf). Acesso em: 30 Fev. 2018.
- GALJAARD, S.; HOFMAN, S.; PERRY, N.; REN, S. **Optimizing Structural Building Elements in Metal by using Additive Manufacturing**. In: Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures -IASS: Future Visions, 17 – 20 Ago. 2015. Amsterdam, Holanda. Disponível em: [file:///E:/Downloads/Additive\\_Manufacturing\\_report\\_for\\_IASS\\_21015.pdf](file:///E:/Downloads/Additive_Manufacturing_report_for_IASS_21015.pdf). Acesso em: 28 Out. 2018.
- GERSHENFELD, N.; GERSHENFELD, J.; CUTCHER-GERSHENFELD. A. **Designing Reality: How to Survive and Thrive in the Third Digital Revolution**. New York: Basic Books, 2017.
- GIBSON, R. F. **Principles of Composite materials Mechanics**. Washington: Mc-Graw-Hill Book, 1994.
- GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. São Paulo: Editora Atlas, 1999.
- GILL, H. *A Continuing Vision: Cyber-physical Systems*. Fourth Annual Carnegie Mellon Conference on the Electricity Industry **FUTURE**. Carnegie Mellon: National Science Foundation, 2008.
- GODOI, G. **Sistemas Generativos de Projeto: Um Estudo de Campo em Monte Alegre do Sul**. 2008. 116 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, Campinas. 2008.
- GODOI, G. Procedimentos algoritmos: o método albertiano. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M. (Orgs.). **Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão**. São Paulo: ProBooks, 2018. P. 29 a 40.
- GONÇALVES, M. M. **O uso do computador como meio para a representação do espaço**. 2009. 339 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - Universidade de São Paulo – USP, São Paulo. 2009.
- GORDON, S. *From slaughterhouse to soap-boiler: Cincinnati's Meat Packing Industry, changing Technologies, and the rise of mass production, 1825 – 1870*. IA. *The journal of the Society for Industrial Archeology*, v. 16, n. 1, p. 55 – 67, 1990.

- GRAMAZIO, F; KOHLER, M. **Digital Materiality in Architecture**. Zurich: Lars Muller Publishers, 2008.
- GREGORY, S. A. (Ed.). **The Design Method**. London: Butterworths, 1966.
- HENRIQUES, J. R. **Contribuição para a otimização da troca de dados geométricos entre sistemas CAD utilizando processadores STEP AP214**. 2004. 154 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro. 2004.
- HENRIQUES, G. C.; BUENO E. Geometrias complexas e desenhos paramétricos. In: Vitruvius, Drops, 030.08, ano 10, s/l: s/e, 2010. Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/drops/10.030/2109%3E>. Acesso em: 02 Abril 2018.
- HEROLD, I. Where structure and ornamentation merge. S/l: ETH Zurich, 2018. Disponível em: <https://www.ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2018/07/where-structure-and-ornamentation-merge.html>. Acesso em: 20 Jan. 2019.
- HILDEBRAND, G. **The Second Industrial Revolution**. S/e: MIT PRESS, 1975.
- HILEMAN, R. **Design Methods: seeds of human futures**. By John Chris Jones 1970, John Wiley and Sons. An introductory lecture for digital designers by Rhodes Hileman. New York: s/e, 1998.
- HOLLAND, G. A **Periodic Table of Form: The secret language of surface and meaning in product design**. In: Core77. Core77 Inc. (Ed.): S/l, 2009. Disponível em: <http://www.core77.com/posts/12752/a-periodic-table-of-form-the-secret-language-of-surface-and-meaning-in-product-design-by-gray-holland-12752>. Acesso em: 10 Dez. 2017.
- HSU, Y. **Geometric modeling and computer graphics**. Curso de modelagem de sólidos. 25 Nov. 2010. Apostila do curso. Yuan Ze University.
- ISSA, R. **Essential Mathematics for Computational Design**. Barcelona: Robert McNeel & Associates, 2013.
- JONES, R. M. **Mechanics of Composite materials**. Washington: McGraw-Hill Book, 1975.
- KIERAN, S.; TIMBERLAKE, J. **Refabricating Architecture: How manufacturing methodologies are poised to transform building construction**. New York: McGraw-Hill, 2004.
- KILIAN A.; OCHSENDORF, J. **Particle-spring Systems for Structural Form Finding**. In: JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES- IASS. V. 46, 147. 2005. Disponível em <<http://designexplorer.net/newscreens/cadenarytool/KilianOchsendorfIASS.pdf>> Acesso em 08 Set. 2015.
- KOENIGSBERGER, O. et alii. **Vivienda y edificios en zonas cálidas tropicalis**. Trad. Emilio Romero Ros. Madrid: Paraninfo, 1977.
- KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age: Design and Manufacturing**. Nova Iorque: Spon Press, 2003.

- KOLAREVIC, B. *Computing the performative*. In: KOLAREVIC, B. (org.). **Performative Architecture: beyond instrumentality**. p. 193-202. Nova Iorque: Spon Press, 2007.
- KOTNIK, T. *Digital Architectural Design as Exploration of Computable Functions*. In: *International Journal of Architectural Computing*. **Issue 01, vol. 08**. S/l: S/e, 2010.
- KOWALTOWSKI, D. C. C. K. Metodologia e CAD no projeto arquitetônico. Seminário Internacional – Computação: Arquitetura e Urbanismo. **Anais**. São Paulo: FAUUSP, 1992.
- LARENA, A. B. *Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporânea: El trabajo de Cecil Balmond*. Tese (Doctorado en Arquitectura). Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2007.
- LAWSON, B. **Como arquitetos e designers pensam**. São Paulo: Oficina de textos, 2011.
- LAWSON, B. e DORST, K. **Design expertise**. S/l.: Architectural Press, 2009.
- LEE, F.; BEAURECUEIL, A. S.; SWAN, J.; SARDENBERG, V.; CAMPOS, O.; PORTELADA, R.; GOMES, F. *CoBLOGó – FACTORY AND OFFICE HEADQUARTER ANNEX*. In: SPERLING, D. M.; HERRERA, P. C. (Eds.). **HOMO FABER - Computer Aided Architectural Design Futures 2015 - CAAD Futures 2015: The Next City**, São Paulo, **Catálogo**, 2015. Disponível em: [www.fec.unicamp.br/~celani/caadfutures\\_2015/homofaber\\_catalogue.pdf](http://www.fec.unicamp.br/~celani/caadfutures_2015/homofaber_catalogue.pdf). Acesso em: 18 Jan. 2018.
- LEONARD, J. *Building tomorrow's delivering the benefits of Industry 4.0 requires robust communication*. In: *Professional Engineering*, v. **28**, nº **2**, p. 16. S/l.:S/e, 2015.
- LOPES, I. A. F. **Estudo do processo de infusão a vácuo em materiais compósitos**. 2009. 63 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto – FEUP, Porto - Portugal. 2009.
- MANOVICH, L. **Język nowych mediów**. Warszawa: S/e, 2006.
- MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos**. São Paulo: Artliber Editora, 2011.
- MCGEE, W.; PONCE DE LEON, M. (Orgs.). **Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014**. Suíça: Springer, 2014.
- MCGUIRK, J. Villa Nurbs by Enric Ruiz-Geli. In: MCLACHLAN, J. (Ed.). **Icon, Features 28.07.11**. Jul. 2011. Disponível em: [www.iconeye.com/architecture/features/item/9164-villa-nurbs-by-enric-ruiz-geli](http://www.iconeye.com/architecture/features/item/9164-villa-nurbs-by-enric-ruiz-geli). Acesso em: 20 Maio 2018.
- MCNEEL, R. e ASSOCIATES. **Rhinoceros NURBS modeling for windows**. EUA: S/e, 2006.
- MCMILLAN, J. **Games, strategies and managers: How managers can use game theory to make better business decisions**. Oxford: Oxford University Press, 1992.

- MEIRELLES, C. R. M.; KISHI, S. Inovação e tectônica na concepção de grandes coberturas na Arquitetura Contemporânea. **Revista Arq.** Urb. Nº 8. s/l: usjt. 2012.
- MENEZES, A. M. O uso do computador no ensino de desenho nas escolas de arquitetura. *In* IV Congresso da Sociedade Ibero Americano de Gráfica Digital – SIGRADI. **Anais.** Rio de Janeiro: SIGRADI, 2000.
- MEREDITH, M. *From Control to Design: Parametric/ Algorithmic Architecture.* Barcelona: Actar-D, 2008.
- MEYER, H. *Plan Analysis.* *In:* DE JONG, T. M.; VAN DER VOORDT, D. J. M. (Eds.) **Ways to study and research urban, architectural and technical design.** Holanda: A-D Druk, 2002. Disponível em: [https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/WTS\\_Preface\\_and\\_Introduction.pdf](https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/WTS_Preface_and_Introduction.pdf). Acesso em: 30 Fev. 2018.
- MINETTO, C, F. **Um estudo sobre curvas NURBS.** 2003. 114 f. Dissertação (mestrado em Matemática Aplicada) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS, Porto Alegre. 2003.
- MITCHELL, W. J. *The theoretical foundation of computer-aided architectural design.* *In:* **Environment and Planning B**, 2 (2, p. 127-150, 1975.
- MITCHELL, W. J. **Antitectonics:** The poetics of virtuality. *In:* BECKMANN, J. (Org.). *The virtual dimensions.* Nova York: Princeton Architectural Press, 1998.
- MITCHELL, W. J. *Roll Over Euclid: How Frank Gehry Designs and Builds.* *In:* RAGHEB, F. (ed.). *Frank Gehry Architect.* Guggenheim Museum Publications: New York, 2001.
- MITCHELL, W. J. **Constructing complexity.** *In:* *Proceedings of the Tenth International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures.* Vienna, Austria: s/e, 2005. Pgs. 41e 50.
- MIYASAKA, E. L. **Projeto para produção de superfícies complexas.** 2017. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – USP - Universidade de São Paulo – USP, São Carlos. 2017.
- MONZON, A. *Smart Cities Concept and Challenges: Bases for the Assessment of Smart City Projects.* *In:* *International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems* – SMARTGREENS 2015. S/l, **Anais**, 2015.
- MOREIRA, D. C. **Os princípios da síntese da forma e a análise de projetos arquitetônicos.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas. 2007.
- NABONI, R.; PAOLETTI, I. **Advanced Customization in Architectural Design and Construction.** Milão: Springer, 2015.
- NILSSON, F. *Architectural Objectiles – Architecture, form, meaning and experience in the digital era.* *In:* *Architecture & Phenomenology International Conference, 1., 2007, Israel. Proceedings CD.*

Israel: S/e, 2007. Disponível em: [http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/46116/local\\_46116.pdf](http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/46116/local_46116.pdf). Acesso em: 30 Ago. 2018.

- NOVAK, M. *Computational composition in architecture*. S/l: S/e, 1998.

- OXMAN, R. *Theory and design in the first digital age*. In: **Design Studies** 27. Grã-Bretanha: Elsevier Ltd. p. 229-265, 2006.

- OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert. *The New Structuralism: design, engineering and architectural technologies*. **AD**, v. 80, p. 15-23, 2010.

- PAGNOTTA, B. Clássicos da Arquitetura: **Museu Guggenheim de Bilbao / Gehry Partners**. In: ArchDaily Brasil, 25 Abril 2016. S/l: S/e, 2016. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/786175/classicos-da-arquitetura-museu-guggenheim-de-bilbao-gehry-partners>. Acesso em: 07 Set. 2018.

- PALERMO, H. N. S. **O sistema Dom-ino**. 2006. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre. 2006.

- PARSONS, M. *Tolerance and Customization: A question of value*. In: **Australian Design Review**. Abril, 2014. Disponível em: <https://www.australiandesignreview.com/architecture/tolerance-and-customisation-a-question-of-value/>. Acesso em: 25/Fev./2017.

- PEDROSA, B.; CÂMARA, G. Modelagem Dinâmica. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M. (Eds.). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.

- PEREIRA, D. C. L. Modelos físicos reduzidos: **uma ferramenta para avaliação da iluminação natural**. 2006. 246 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo - Área de Concentração Tecnologia da Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.

- PICON, A. **A arquitetura e o virtual: Rumo a uma nova materialidade**. In: SIKES, A. K. (Org.). **O campo ampliado da arquitetura: Antologia teórica 1993 – 2009**. São Paulo: Cosac Naify, 2013.

- PICORAL, R. B. “Projeto arquitetônico da idade média ao século XX”. KOTHER, B. M; FERREIRA, M. S. e BREGATTO, P. R. (Orgs.). **Arquitetura & urbanismo: Posturas, tendências & reflexões**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2006.

- PIEGL, L. e TILLER, W. **The NURBS Book**. S/l: Springer Verlag, 1997.

- PINTO, S. L. U.; AZEVEDO, I. S. C.; SANTOS, G. S. P.; HAMAND, A. F.; TEIXEIRA, C. S. **O movimento Maker: Enfoque nos FabLabs Brasileiros**. In: Conferência ANPROTEC, 26, Fortaleza, 2016. Resumos. Fortaleza: ANPROTEX, 2016.

- PONTES, T. N.; ALVES, K.; CARDOSO, M. **Formas & fórmulas**. Catálogo Online. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2012. Disponível em: [http://issuu.com/formas-formulas/docs/cat\\_logo\\_exposi\\_\\_o](http://issuu.com/formas-formulas/docs/cat_logo_exposi__o). Acesso em: 05 Set. 2018.
- POTTMAN, H.; ASPERL, A.; HOFER, M.; KILIAN, A. **Architectural Geometry**. Pennsylvania: Bentley Institute Press, 2007.
- RANGEL, A. P. **Curvas**. 2003. 114 f. Tese (doutorado em Ciências Físicas e Matemáticas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ, Rio de Janeiro. 1974.
- RIBEIRO, J. **O que é positivismo**. São Paulo: Editora Brasiliense, 1988.
- RUIZ-GELI, E.; AMAT, F.; CUMELLA, T. Villa Nurbs. In: GLYNN, R. e SHEIL, B. **Fabricate 2011**. Londres: UCL Press, 2017.
- SACOMANO, J. B.; SÁTYRO, W. C. A indústria 4.0 e seus elementos formadores. In: SACOMANO, J. B.; GONÇALVES, R. F.; SILVA, M. T.; BONILLA, S. H.; SÁTYRO, W. C. (Orgs.). **Indústria 4.0: conceitos e fundamentos**. São Paulo: Blucher, 2018. P. 17 a 24.
- SALES, I. **O pensamento Glocal de Canevacci**.: Diário do Nordeste. 2015. Ceará: 28 março de 2015. Diário. Disponível em: <http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/verso/o-pensamento-glocal-de-canevacci-1.1254729>. Acesso em: 18 fev. 2018.
- SALINGAROS, N. A. **Twelve Lecture on Architecture: Algorithmic Sustainable Design**. Solingen: Umbau-Verlag, 2010.
- SANTOS, Z. M. S. P. **Elaboração de um Arquivo Arquitectónico inserido num Modelo Tridimensional Urbano**. Dissertação (mestrado em Detecção Remota) – Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2003.
- SCHMIT, L. A. **Structural design by systematic synthesis**. *Proceedings of the 2nd Conference on Electronic Computation*, p. 105-122. S/l: S/e, 1960.
- SCHÖN, D. *The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action*. London, UK: Temple Smith, 1983.
- SCHWAB, K. **The fourth industrial revolution**. Suíça: *World Economic Forum*, 2016.
- SEDERBERG, T. W.; ZHENG, J.; BAKENOV, A.; NASRI, A. *T-splines and T-NURCCs*. In: *ACM Transactions on Graphics* **22(3)**. s/l:ACM, 2003. P. 477 a 484.
- SEDERBERG, T. W.; SEDERBERG, M. T. *T-Splines: A Technology for Marine Design with Minimal Control Points*. s/l: s/e, 2010. Disponível em: [http://www.ndar.com/press\\_conferences-cd/articles/T-Splines%20Chesapeake%20paper.pdf](http://www.ndar.com/press_conferences-cd/articles/T-Splines%20Chesapeake%20paper.pdf). Acesso em: 23 Jul. 2018.
- SEDREZ, M. Geometria Fractal: da escala do edifício à da cidade. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M. (Orgs.). **Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão**. São Paulo: ProBooks, 2018. P. 55 a 68.

- SEDREZ, M.; MARTINO, J. A. Sistemas Generativos. In: CELANI, M. G. C.; SEDREZ, M. (Orgs.). *Arquitetura contemporânea e automação: prática e reflexão*. São Paulo: ProBooks, 2018. P. 55 a 68.
- SEMPER, G. *The four elements of Architecture and others writings*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- SGUIZZARDI, S. Modelando o futuro: **A evolução do uso de tecnologias digitais no desenvolvimento de projetos de arquitetura**. Dissertação (mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Dissertação apresentada à faculdade de arquitetura e urbanismo para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo. São Paulo: FAU USP, 2011.
- SILVA, E. R. V. M. **Pós-processamento de topologia em otimização estrutural integrada**. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. 2014.
- SILVEIRA, L.; LIMA, W. Q. Um breve histórico conceitual da Automação Industrial e Redes para Automação Industrial. Lagoa Nova: UFRN, 2003.
- SLANN, P. A. *Foreword*. In: JONES, J. C.; THORNLEY, D. G. (ed.). **Conference on design methods**. Oxford: Pergamon Press, 1963.
- SLYK, J. *Antitectonics – architecture for information society*. In: **Architectus**, nº 2(28). S/l: S/e, 2010.
- STROUD, I. *Boundary Representation Modelling Techniques*. Londres: Springer-Verlag, 2006.
- STUMP, F. **Otimização topológica aplicada ao projeto de estruturas tradicionais e estruturas com Gradação funcional sujeitas a restrições de tensão**. Dissertação (mestrado em engenharia civil). Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Cvil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – POLI USP para obtenção do título de Mestre. São Paulo: POLI USP, 2006.
- TEDESCHI, A. *AAD\_Algorithms Aided Design. Parametric strategies using Grasshopper*. Itália: Le Pensur, 2014.
- TERRA, U. D. S. **Arquitetura em espaços de fluxo modelagem e simulação em estações metroferroviárias e espaços de multidão**. Dissertação (mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – FAU USP como requisito para obtenção do título de Mestre. São Paulo: FAU USP, 2014
- TERZIDIS, K. *Algorithmic Architecture*. S/l: Routledge, 2006.
- TÖNNIES, F. *Community and Society*. Mineola: Dover, 2002.
- TOWNSAND, A. *On the Spline: A Brief History of the Computational Curve*. In: Jonathan Anderson e Meg Jackson (Ed.). *International Journal of Interior Architecture + Spatial Design, Applied Geometries*. V. 3. S/l: s/e, 2014.

- VAN DEN HEUVEL, F., A. **Trends in CAD-based Photogrammetric Measurement**. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII, Parte B5. Amsterdam, 2000.
- VAN DER VOORDT, T. J. M.; VAN WEGEN, H. B. R. **Architecture in Use: An Introduction to the programming Design and Evaluation of Buildings**. Oxford: Architectural Press, 2005.
- VETTORETTI, A. C. Bancos para ler e conversar: **parâmetros de projeto para sistema de design generativo**. Porto Alegre: UFRGS, 2010.
- WILKE, T. Tacti(ca)lity Reclaimed: Benjamin's Medium, the Avant-Garde, and the Politics of the Senses. In: *Grey Room 39*, nº 40. S/l: MIT, 2010.
- WINTERER, J. *Frank Gehry's Winton Guest House Has a New Owner*. In: *Academic news +*, Maio 19. Minnesota: *Newsroom*, 2015. Disponível em: <https://news.stthomas.edu/frank-gehrys-winton-guest-house-new-owner-today/>. Acesso em: 22 Ago. 2018.
- WIRZ, F. *Foreword*. In: TEDESCHI, A. **AAD\_Algorithms Aided Design**. Parametric strategies using Grasshopper. Itália: Le Penseur, 2014.
- WITKOWSKI, K. *Internet of things, big data, Industry 4.0: Innovative solutions in logistics and supply chains management*. In: *Procedia Engineering*. V. 182, p. 763 à 769. Amsterdam: Elsevier, 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817313346>. Acesso em: 12 Dez. 2018.
- WOODBURY, R. **Elements of parametric design**. Canadá: Routledge, 2010.
- YUAN, P. *Parametric Regionalism*. In: CASTLE, H. (Ed.) *Architectural Design 86. Parametricism 2.0: Rethinking Architecture's agenda for the 21st Century*. Vol. 86, Issue 2. Mar. 2016.
- YOUNG, M. *Digital Remediation*. In: CORNELL APP (Ed.). *The Cornell Journal of Architecture*. V. 8. S/l: Cornell University, 2011. Disponível em: <http://cornelljournalofarchitecture.cornell.edu/read.html?id=74>. Acesso em: 07 Jan. 2018.