

# NÍVEIS DE COMPUTABILIDADE EM PROCESSO DE PROJETO

## Casos e especificidades

### LEVELS OF DESIGN COMPUTABILITY: Cases and specificities

Tássia Borges de Vasconcelos<sup>1</sup> e David Moreno Sperling<sup>2</sup>

#### Resumo

Diante de um cenário de utilização massiva do computador em processos de projeto, pretende-se apresentar e sistematizar três lógicas gerais do uso dos ambientes digitais no contexto de projeto na arquitetura contemporânea, a partir de definições propostas por Rivka Oxman (2006) e Toni Kotnik (2010). Articuladas a essas definições, estas lógicas são exemplificadas por meio de metodologia baseada em Estudo de Caso, com a explicitação de processos de concepção de obras contemporâneas emblemáticas como o *Guggenheim Museum Bilbao*, o *International Terminal at Waterloo Station* e o *Water Cube*; respectivamente categorizados sob os níveis de computabilidade representacional, paramétrico e algorítmico. Assim, procura-se evidenciar a potencialidade do uso do computador como uma mídia ativa no processo projetual, os quais trazem possibilidades e desafios distintos para o projeto e a produção da arquitetura.

Palavras-chave: Níveis de computabilidade projetual, projeto paramétrico, projeto algorítmico, arquitetura contemporânea, método de projeto.

#### Abstract

*Faced with a scenario of massive use of the computer in design processes, it is intended to present and systematize three general logics of the use of digital environments in the context of design in contemporary architecture, taking up definitions proposed by Rivka Oxman (2006) and Toni Kotnik (2010). Linked to these definitions, these logics are exemplified through a case study based methodology, by explaining the design processes of emblematic contemporary works as the Guggenheim Museum Bilbao, the International Terminal at Waterloo Station and the Water Cube. They were categorized respectively under the levels of representational, parametric and algorithmic computability. Thus, it seeks to highlight the potential of using the computer as an active medium in the design process, according to specific levels of computability, which bring different possibilities and challenges for the design and production of architecture.*

*Keywords: Levels of design computability, parametric design, algorithmic design, contemporary architecture, design method.*

#### O processo de projeto, da representação analógica à mídia ativa

Em arquitetura, tradicionalmente, o desenvolvimento do processo projetual está relacionado à uma linguagem gráfica e por conseguinte aos códigos e saberes incorporado no ato de representar. Desta forma, destaca-se a importância da representação, visto que muitas vezes ela é associada diretamente à própria profissão do arquiteto, e não distante, com o saber projetar, conforme apresentado por Lawson:

A imagem arquetípica do projetista é de alguém sentado à prancheta. Mas o que fica claro é que ele exprime as suas ideias e trabalha de modo muito gráfico e visual. Realmente, seria muito difícil tornar-se um bom projetista sem desenvolver a capacidade de desenhar bem<sup>3</sup> (LAWSON, 1980, p. 13, tradução dos autores).

Durand (2003) sistematiza as representações de um projeto segundo seus objetivos, dividindo-as em três tipos, a primeira voltada à concepção, a segunda ao convencimento da equipe de trabalho ou cliente e a terceira relacionada com as fases de execução. Neste artigo, estamos interessados no primeiro tipo, entendendo-o como um modo externalizado para introspecção, que auxilia o arquiteto a expressar a formulação do problema, explicitar as possíveis soluções, testar e verificar o atendimento a soluções, mesmo que estas sejam explorações de questões subjetivas.

Deve-se destacar que assim como expressado por Woodbury (2010), há décadas atrás a representação de um objeto em processo de concepção era compreendida apenas como o resultado da interação de um arquiteto com o desenho em papel, considerando variações, das representações menos às mais estruturadas. No entanto, surgem novos meios para a concepção diante da revolução digital que, conseqüentemente, modificam as relações estabelecidas na representação em arquitetura (KOLAREVIC, 2003).

Propiciados pela incorporação do ambiente digital e incorporando novas dinâmicas processuais, alguns destes desenvolvimentos estabelecem uma relação/interação menos direta entre o arquiteto e a representação figurativa do objeto em processo de concepção. Aqui encontram-se, portanto, as prerrogativas para o entendimento de uma prática projetual associada a lógica da incorporação da mídia ativa: “distinguir a representação como o modo lógico e operativo dominante da geração formal no design” (OXMAN & OXMAN, 2014, p. xxvii, tradução dos autores).

Olhando em perspectiva o cenário da incorporação das mídias digitais na produção de arquitetura pode-se ter uma aproximação histórica e outra do presente, que apresentam distintas modulações temporais. Se por um lado, tem-se uma vasta produção arquitetônica que foi constituída historicamente até a metade do século passado com extrema qualidade e complexidade sem a utilização do computador, por outro, passa a haver uma incorporação cotidiana do seu uso, e que não é mais uma novidade. Já estamos há quase 60 anos das primeiras implementações dos computadores na área, tornando-se cada vez mais essenciais em todas as fases projetuais, com potencialidades que tornam a sua negação inviável. Sendo uma novidade para a trajetória da arquitetura, não se pode, entretanto, interpretar como novidade para os arquitetos da atualidade.

<sup>1</sup> Mestre, Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP) – São Carlos, Brasil

<sup>2</sup> Doutor em Arquitetura e Urbanismo, Docente do Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo (IAU-USP) – São Carlos, Brasil

<sup>3</sup> The archetypical image of the designer is of someone sitting at a drawing board. But what is clear is that designers express their ideas and work in a very visual and graphical kind of way. It would be very hard indeed to become a good designer without developing the ability to draw well (LAWSON, 1980, p. 13).

No Brasil, a título de recuperação, em 1994 o currículo dos cursos de graduação em Arquitetura e Urbanismo foi revisto e passou por diversas alterações, que pretendiam uma unificação da base curricular, definindo diretrizes e conteúdos mínimos. Uma destas diretrizes estava associada à obrigatoriedade da implementação da disciplina de Informática Aplicada, com suas especificidades apresentadas a seguir:

8º - O estudo da Informática Aplicada à Arquitetura e Urbanismo abrange os sistemas de tratamento da informação e representação do objeto aplicados à arquitetura e urbanismo, implementando a utilização do instrumental da informática no cotidiano do aprendizado<sup>4</sup> (BRASIL, 1994, p. 20).

Diante desta obrigatoriedade, 15 anos após a divulgação das diretrizes, Duarte, Celani e Pupo (2011) sintetizaram dois discursos antagônicos comuns sobre a importância do computador no processo de projeto, tanto em âmbito acadêmico como profissional, e que ainda se fazem presentes. De um lado os que o entendem como imprescindível e, de outro, os que veem apenas reservas.

Entre o contexto das dicotomias verificado pelos autores há 10 anos atrás e o contexto atual, muito se avançou no debate, na disponibilidade de programas avançados para projeto e em sua exploração, seja no âmbito do ensino, seja no profissional. Neste intervalo, cresceu a compreensão social na disciplina de que a tecnologia pode contribuir para além da execução da representação. Uma questão chave, dentre outras, é a sua capacidade crescente de auxiliar a ampliação do conjunto de respostas possíveis e sua avaliação segundo critérios explícitos ao longo do processo de projeto. Permite, assim, agilizar a transição para novas alternativas projetuais, como a exploração de formas e cenários complexos, dando suporte à análise preditiva de aspectos importantes para o arquiteto e à investigação dentro de um espaço de soluções viáveis.

Mas, em meio à ampliação das possibilidades computacionais para projeto de arquitetura, reafirma-se o papel central do arquiteto, que passa a conceber explicitamente o próprio processo projetual a ser operacionalizado por meio de interfaces homem-máquina. Altera-se a função da representação gráfica, pois a linguagem de comunicação com o computador vai além de representações simbólicas, conforme explicitado em Mitchell (1975). Retomando Woodburry (2010), pode-se considerar a função primeira do ambiente digital em processo de projeto não é o da representação, mas o de mediação ativa:

Pessoas fazem projeto. Planejar e implementar mudanças no mundo que nos rodeia é uma das coisas-chaves que nos torna humanos. Linguagem é o que dizemos; projetar e confeccionar é o que fazemos. Computadores são simplesmente um novo meio para este antigo empreendimento. Verdade, eles são as primeiras mediações ativas. Como símbolo geral de processadores, computadores podem apresentar tipos quase ilimitados de ferramentas. Com trabalho e cuidado, nós podemos programá-los para fazer muito do que chamamos de projeto. Mas não tudo<sup>5</sup> [...] (WOODBURRY, 2010, p. 7, tradução dos autores).

<sup>4</sup> <https://www.jusbrasil.com.br/diarios/DOU/1994/12/23>, acessado em março de 2020.

<sup>5</sup> "People do design. Planning and implementing change in the world around us is one of the key things that make us human. Language is what we say; design and making is what we do. Computers are simply a new medium for this ancient enterprise. True, they are the first truly active medium. As general symbol processors, computers can present almost limitless kinds of tools. With craft and care, we can program them to do much of what we call design. But not all. [...]" (WOODBURRY, 2010 p. 7)

Diante das potencialidades das mediações ativas que vêm se apresentando à arquitetura, este artigo tem interesse em focar alguns processos de projeto em ambiente digital, e que claramente fazem uso de suas potencialidades, segundo sistematização que será apresentada a seguir. Para isso, retomaremos autores que se dedicaram à constituição de um campo de investigação sobre os processos e metodologias de projeto no ambiente digital, e que de alguma forma buscaram explicitar e/ou sistematizar procedimentos dentro de um contexto tão complexo e singular que é o processo de projeto.

Como o enfoque deste artigo parte de conhecimentos específicos, emergentes a partir do desenvolvimento da utilização da mídia digital na área de Arquitetura e Urbanismo nestes últimos 60 anos, e principalmente nas últimas décadas, compreende-se pertinente um aprofundamento teórico inicial. Assim apresentaremos um termo importante na construção dos saberes que aqui serão explicitados, no caso, "parâmetro". E posteriormente apresentaremos a classificação que organiza os casos de estudos que serão apresentados.

### Parâmetro

O termo *parâmetro* está em ascensão, e é onipresente no discurso da arquitetura da era digital, em suas inúmeras derivações. Tem-se a partir deste: *parametricismo*, *arquitetura paramétrica*, *desenho paramétrico*, *modelagem paramétrica*, dentre outros. No processo de interação com o computador, cada vez mais é necessária a aproximação de uma linguagem algébrica, a qual inclui saberes advindos da matemática. Tem-se, portanto:

Parâmetro: Algo que decide ou limita a maneira que algo pode ser feito (OXFORD, 2015 s. p., tradução dos autores)

Parâmetro: <sup>a</sup> MATEMÁTICA Denominação dada a uma variável de caráter secundário, com alguma função especial, que tem como finalidade os objetos de um conjunto ou de uma família.<sup>b</sup> MATEMÁTICA Todo elemento em que sua variação de valores modifica a solução de um problema, sem, contudo, modificar sua natureza.<sup>c</sup> Elemento variável que participa da elaboração de um conjunto e que também constitui um todo. [...] <sup>d</sup> INFORMÁTICA Informação que define os limites ou as ações de alguma coisa, tais como uma variável, uma rotina ou um programa (MICHAELIS, 2019, s. p.).

A partir das definições acima, parâmetro, no contexto da matemática e por conseguinte da informática, é colocado em segundo plano em relação ao conjunto que faz parte. E principalmente, identifica-se que o cerne da equação paramétrica não é a presença de parâmetros, mas sim como estes mesmos parâmetros se organizam e se relacionam entre si de maneira a gerarem resultados por meio de funções explícitas.

Para além da associação direta amplamente realizada em arquitetura, entre equações paramétricas, desenho paramétrico e exploração formal de complexidades geométricas, deve-se identificar quais são as questões realmente fundamentais a partir das conceituações anteriores sobre equações paramétricas. Assim, para uma abordagem focada na área de arquitetura traz-se o argumento de Daves, para quem o foco estaria na associação lógica e explícita entre as partes do objeto resultante e não no resultado:

Eu argumento que existe a propensão em definir um modelo paramétrico a partir dos resultados, no entanto, a característica definidora de um modelo paramétrico não são os resultados, mas sim a necessidade de construir e manter relacionamentos e associações no modelo<sup>6</sup> (DAVES, 2013, p. 15).

Assim, a exploração mais consciente das potencialidades do computador perpassa a utilização do desenho paramétrico. Rivka e Robert ressaltam a importância dos sistemas paramétricos lançados na primeira década do milênio indicando esta alteração:

O projeto paramétrico tem sido muito produtivo para a pesquisa e para o projeto arquitetônicos, que agora é possível falar de forma paramétrica, ou dos atributos formais intrínsecos à geração e gerenciamento de formas com parâmetros<sup>7</sup> (Oxman & Oxman, 2014, p. 57).

### A interação entre e computador e o projetista - Níveis de computabilidade

Primeiramente considera-se importante compreender o significado da palavra interação como “a ocasião em que duas pessoas ou coisas comunicam-se entre elas ou reagem uma com a outra” (CAMBRIDGE, 1995). A origem da palavra vem do Latim: *inter* (entre) e *ação* advém de agere (realizar, fazer). Principalmente a partir dos processos comunicacionais, pode-se compreender a existência de uma relação, a qual pode ser estabelecida em apenas um sentido ou nos dois sentidos.

Com o foco no processo de projeto dentro do contexto de arquitetura e urbanismo, muitos autores abordam o feito de Ivan Sutherland em 1963 indicando como a primeira demonstração de interação do homem com um computador. No início do século XXI, a pesquisadora e professora Rivka Oxman em um contexto de ensino de Arquitetura e Urbanismo, a partir da abordagem explicitada no artigo *Theory and design in the first digital age*, compreende ser pertinente uma reflexão sobre teorias e metodologias projetuais, dando a devida importância para a expressão *interação*. Esta reflexão guia este artigo e é estruturada principalmente por estar diante de uma produção crescente de práticas de projeto/design digital no âmbito da arquitetura, a qual é amparada pela evolução da tecnologia, apontando ser necessário rever as teorias frente às novas possibilidades da utilização do computador.

Em Oxman (2006) são reexaminadas as teorias sobre o processo projetual no ambiente digital, e para ampliar esta compreensão, a autora propõe quatro componentes a serem considerados como inerentes ao design digital: representação, avaliação, performance e geração; e organiza-os em torno da figura do arquiteto, de modo que, dependendo como as conexões são estabelecidas, e se as informações que transitam entre estes componentes são implícitas ou explícitas, têm-se diferentes tipos de interações entre o arquiteto e a representação.

A preservação do papel central do arquiteto nos processos de projeto em ambiente digital, preservado nas taxonomias de Oxman (2006) nas implementações menos ou

<sup>6</sup> I argue that there is a propensity to define parametric modelling in terms of the model's outputs even though the defining feature of a parametric model is not the outputs but rather the need to construct and maintain relationships associated with the model (DAVES, 2013, p.15)

<sup>7</sup> Parametric design has been so productive for architectural research and design that it is now possible to speak of parametric form, or the formal attributes intrinsic to form generation and management with parameters. (Oxman & Oxman, 2014, p. 57)

mais conscientes das potencialidades do computador, é importante para subverter a ideia que o computador é o sujeito/agente centralizador neste processo.

Oxman (2006) sistematiza formas de interação do arquiteto com a representação no ato projetual. Deste modo, tendo como base as possibilidades desta interação, a autora propõe a distinção de quatro tipos de interação, as quais permitem diferenciar quatro modos distintos de processos de projeto. Assim foram propostas por Oxman (2006): a) *interaction with paper-based representation* (Interação com o papel: baseada em representação) b) *interaction with digital constructs* (Interação com constructos digitais) c) *interaction with a digital representation generated by a mechanism* (Interação com a representação digital gerada por um mecanismo) e d) *interaction with digital environment that generates a digital representation* (Interação com o ambiente digital que gera a representação digital).

Logo, considera-se que a primeira, interação com o papel: baseada em representação, estabelece-se no ambiente físico e não requer a utilização do ambiente digital. A autora destaca que o modelo tradicional de concepção projetual é baseado em conhecimentos implícitos, e o processo de geração e avaliação não são formalizados. Como o foco desta pesquisa é dirigido apenas a processos que se estabelecem no ambiente digital, a interação com o papel não será abordada.

Interessa, portanto, a sistematização que faz a autora de uma taxonomia do projeto digital, exemplificando-a com projetos desenvolvidos com esses tipos de interações. Tendo sido já abordado e esquematizado graficamente os tipos de interação em artigo anterior (VASCONSELOS & SPERLING, 2017), no presente artigo serão focadas especificamente as diferentes interações sem que sejam exploradas as subcategorias entre esses tipos.

A partir da sistematização realizada por Oxman, o pesquisador e professor Toni Kotnik apresentou, em 2010, os níveis de computabilidade no processo de projeto, com uma abordagem mais direta em relação às diferentes interações. Assim os *tipos de interação* propostos por Oxman tem as seguintes equivalências com os *níveis de computabilidade* de Kotnik:

a Interação com constructo digital é definida como nível de computabilidade representacional, a Interação com a representação digital gerada por um mecanismo como nível de computabilidade paramétrico e Interação com o ambiente digital que gera a representação digital como nível de computabilidade algorítmico.

Compreende-se que as sistematizações feitas por Oxman (2006) e Kotnik (2010) permanecem válidas e permitem elucidar claramente as lógicas gerais do uso dos ambientes digitais no contexto contemporâneo de projeto. Fazendo-se apenas uma observação sobre os termos utilizados, visto que com o passar do tempo e avanço da tecnologia alguns termos são revistos, o emprego do termo *Digital Architectural Design* (Oxman, 2006) (Oxman, 2008), foi substituído por *computational design*, termo corrente em publicações posteriores, como Oxman & Oxman (2014), Picon (2014) e (Oxman, 2017), dentre outras. Considera-se que este termo retrata uma compreensão mais adequada ao momento de reflexão sobre a produção na “era digital” claramente vinculada aos níveis de computabilidade.

Este artigo tem, portanto, o propósito de explicitar como se estrutura, em termos gerais, um processo projetual em cada um dos níveis de computabilidade, utilizando-se do acervo sobre o processo projetual de obras de arquitetura emblemáticas já construídas.



## Metodologia

Para este desenvolvimento foi utilizada a metodologia baseada em Estudo de Caso realizada a partir da compreensão de um fenômeno contemporâneo (Yin, 1993; Groat & Wang, 2011), com o objetivo de visualizar detalhadamente alguns exemplos de experimentações de processos projetuais que utilizam o ambiente digital como instrumento deste desenvolvimento.

O Estudo de Caso define-se como pesquisa qualitativa, que se debruça no aprofundamento do conhecimento sobre parte de uma determinada realidade, em relação a qual se infere que este caso possua características elucidativas. Neste estudo, o critério fundamental da seleção dos casos foi terem sido referenciados em artigos científicos de autores reconhecidos e a disponibilidade de registros dos processos projetuais dessas obras, para análise.

O desenvolvimento do Estudo de Caso partiu, portanto, da seleção de alguns dos exemplos anteriormente identificados por Oxman (2006) ou Kotnik (2010), os quais não tiveram suas especificidades evidenciadas pelos mesmos autores para que recebessem determinada categorização. Para desenvolver o aprofundamento sobre as obras, partiu-se principalmente do discurso dos arquitetos e engenheiros responsáveis por meio de coleta de material sobre as obras, tanto em entrevistas quanto na apresentação dos projetos nos próprios sites dos escritórios. Ainda, as imagens selecionadas são relativas aos processos de projeto e seus resultados (obras construídas), com as quais busca-se preencher lacunas no discurso analisado. Diante da grande maioria do material coletado ser proveniente do acervo dos escritórios, identifica-se que é uma pesquisa com um recorte de narrativa direcionada pelos próprios autores das obras.

Sendo assim, busca-se aqui apresentar diferenciações entre os níveis de computabilidade, abordando aspectos de processos projetuais, do *Guggenheim Museum Bilbao*, para o nível de computabilidade representacional; do *International Terminal at Waterloo Station*, para o nível paramétrico; e do *Water cube*, para o nível algorítmico, apresentados na Figura 1 (A), (B) e (C).

Obras apresentadas: A) Guggenheim Museum Bilbao, B) International Terminal at Waterloo Station C) Water Cube. Fonte: Respectivamente disponível em: <https://www.britannica.com/place/Bilbao>, <https://grimshaw.global/projects> e <http://www.ptw.com.au/>. Acessado em: outubro de 2020.



## Nível de computabilidade representacional - *Guggenheim Museum Bilbao*

Em um processo de projeto baseado em um nível de computabilidade representacional, o arquiteto interage diretamente com a representação. Dentro desta dinâmica existe um espectro de possibilidades, iniciando em desenvolvimentos realizados com a lógica da transposição de uma abordagem de projeto convencional em papel para o espaço digital, estabelecendo-se a partir de um esboço, desenho ou modelo digital. É muito associado a um modelo tradicional de utilização do CAD por meio de desenhos 2D e 3D.

Dentro do mesmo nível, ainda existem desenvolvimentos com estratégias de utilização da ferramenta mais arrojadas, podendo-se identificar dinâmicas de análise do modelo desde que estas não o modifiquem ou restrinjam automaticamente diante de resultados insatisfatórios, por exemplo. Oxman (2008) e Kotnik (2010) indicam que este nível, como metodologia de projeto, difere dos níveis de computabilidade paramétrico e algorítmico pelo menor grau de consciência, por parte do arquiteto, do fundo computacional envolvido no processo.

Nas abordagens do nível de computabilidade representacional, o projetista não tem possibilidade de modificação facilitada, pois a linguagem estabelecida com o computador não é baseada em um controle explícito. Para descrever esta semelhança com o projeto convencional em papel, Kotnik utiliza a expressão “ferramenta de desenho eletrônica” (2010, pag. 8). Podemos identificar objetivamente o que ocorre pela seguinte função descrita por Kotnik:  $F(in) = F(out)$ . Cada alteração faz uma modificação, cada informação incluída gera apenas uma possibilidade de resultado.

Ainda no mesmo nível, tem-se explorações que utilizam as mídias digitais para transferir informações entre os ambientes físico e digital, sem que com isso se altere a lógica  $F(in) = F(out)$ . Um processo de projeto com significativa exploração do nível de computabilidade representacional é o do Guggenheim Museum Bilbao desenvolvido pelo arquiteto Frank Gehry, obra inaugurada em 1997<sup>8</sup>.

O foco aqui é conferido às primeiras etapas do projeto, quando se fez presente o nível representacional no processo criativo, não se considerando as etapas seguintes nas quais houve a incorporação de parametrização para ajuste na fabricação desta obra, condizente ao terceiro tipo de representação previamente apresentado de acordo com a sistematização de Durand (2003).

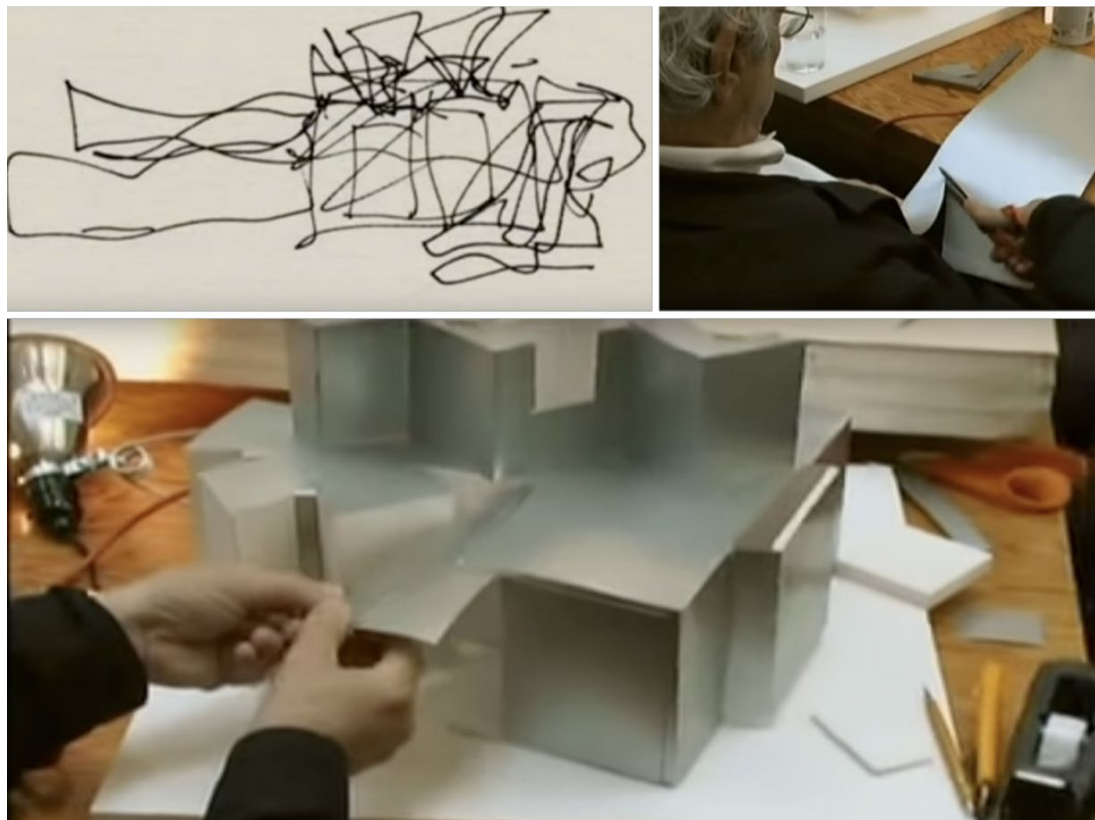
As primeiras etapas, como apresentadas no Documentário *Sketches of Frank Gehry* (Figura 2) foram realizadas por meio de croquis e maquetes no ambiente físico, em ações orientadas à investigação escultural de superfícies curvas. Essa tônica de trabalho já havia sido indicada pelo discurso do arquiteto quando recebeu, em 1989, o Prêmio Pritzker “*I approach each building as a sculptural object [...]*” (GEHRY, 1989, s. pág.). Conforme aborda Kolarevic (2003), as maquetes passam, em seguida, por um processo de digitalização, por meio de escaneamento por varredura de pontos, pelo qual a informação do ambiente físico é transportada para o ambiente digital (Figura 3) e vice-versa, do digital ao físico, com o uso da fabricação digital, para a verificação e apreciação das formas por parte do arquiteto.

Embora a posteriori exista um tratamento destes dados pelo escritório como um todo,

<sup>8</sup> É importante ressaltar, que esta análise se dirige especificamente a este projeto realizado na década de 90 e aos modos de investigação projetual presentes no escritório naquele período, pois sabe-se que posteriormente acompanhou o desenvolvimento das tecnologias digitais, inclusive com a co-criação de softwares.



Figura 2: Imagens do processo sem exploração do ambiente digital de Frank Gehry. Fonte: Imagens retiradas do Documentário: <?> Sketches of Frank Gehry. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=VYt2SQPqTh0> acessado em: 12 de novembro de 2020.



entende-se que o processo de projeto e o desenvolvimento dos conceitos que resultam no objeto está vinculado diretamente ao arquiteto principal e seu processo de projeto. Mesmo que em escritórios estruturados de forma similar existam arquitetos com um entendimento mais claro sobre a potencialidade do computador, eles não modificam o processo de projeto propriamente dito.

Este entendimento parte de certa generalização, pois sabe-se que existem muitos escritórios com uma proposta de criação horizontal baseada na colaboração de diferentes agentes. No entanto, o que se perpetua, normalmente, é a centralização do papel criador aos *seniors* dos escritórios, não tão habituados a esta interação mais avançada com o computador. Diante desse tipo de arranjo produtivo dos escritórios, Picon indaga “Até que ponto esta produção, que segue conectada à intuição e às ideias dos empregadores, é realmente digital?”<sup>9</sup> (PICON 2014, p. 47, tradução autores). Oxman (2008) aponta, em contrapartida, o papel relevante que uma primeira geração de experimentações teve para mudanças de paradigmas:

As novas relações entre a forma digital e os processos digitais estão contribuindo hoje para o surgimento de novo vocabulário conceitual e ao domínio do conhecimento. Estão caracterizando o que podem legitimamente ser considerados os primeiros estágios formativos de uma mudança de paradigma<sup>10</sup> (Oxman, 2008, pág 106, tradução autores).

Sendo esta questão ainda muito debatida atualmente (PICON, 2014), interessa avançar em direção aos níveis seguintes de computabilidade, demarcando que,

<sup>9</sup> “To what extent is their production, which closely follows the intuition and ideas of their employers, really digital?” (Picon, 2014, p. 47).

<sup>10</sup> “The new relations between digital form and digital processes are contributing today to the emergence of new conceptual vocabulary, and domain knowledge. It characterizes what might legitimately be considered the early formative stages of a paradigm shift” (Oxman, 2008, p. 106)

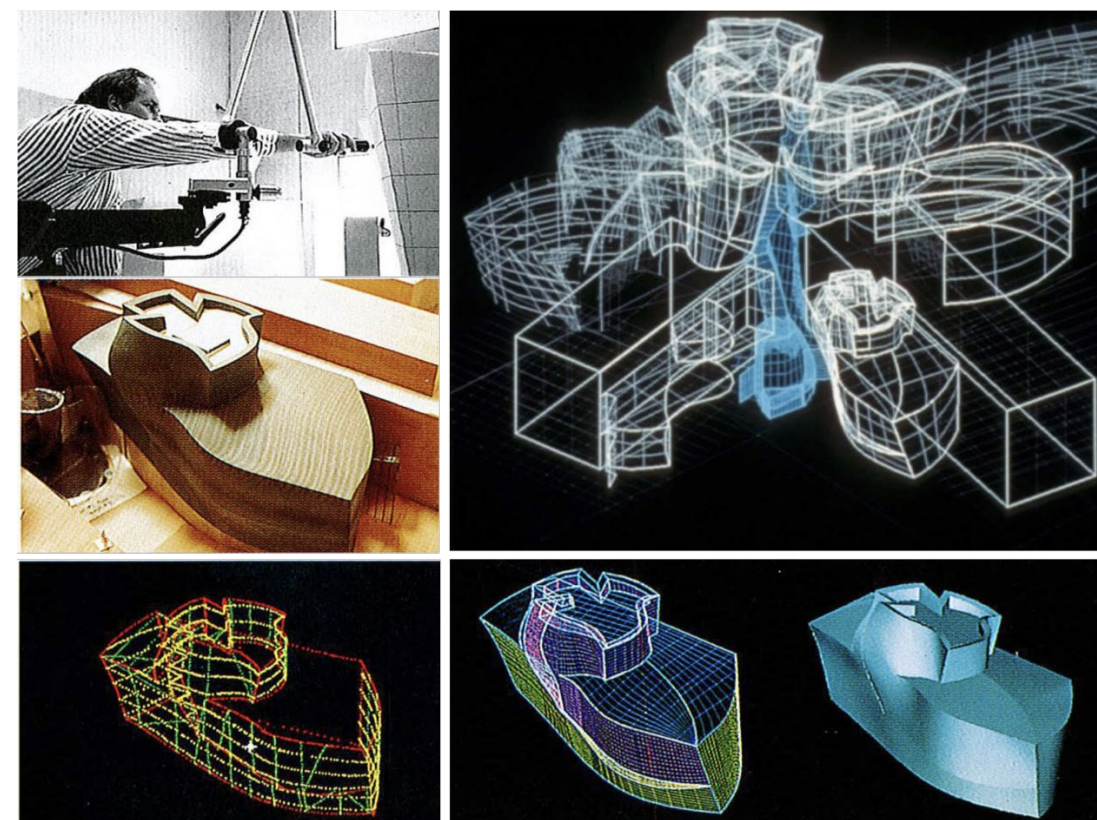


Figura 3: Composição do processo de exploração das conexões entre o ambiente físico e o digital de Frank Gehry. Fonte: Imagens retiradas de Kolaravick (2003), e disponível em: <http://www.professionistuniti.it/>. Acessado em: maio de 2018

segundo Kotnik (2010), existe uma ruptura entre o nível de computabilidade representacional e o nível de computabilidade paramétrico, que representa o limite do projeto digital - *Digital Design threshold*.

### Nível de computabilidade paramétrico - *International Terminal at Waterloo Station*

Parte-se do entendimento que o nível de computabilidade paramétrico é uma representação digital estruturada por informações que se organizam diante regras pré-definidas, na qual as possibilidades podem ser diferenciadas dentro de um espectro de variações contínuas dos parâmetros. Os *inputs* estabelecidos pelo arquiteto e as relações de fluxo desta informação podem afetar em como serão realizadas as variabilidades (Woodbury, 2014).

A variabilidade pode estar condicionada a fatores externos já analisados, sendo diretamente lançados pelo arquiteto ou por uma ferramenta de análise que possibilita uma compreensão mais complexa da situação, de modo que existam impeditivos específicos para o desenvolvimento do objeto criado, ou o *output* de informação. Um exemplo bastante simples desse funcionamento seria a definição de condicionantes para o formato de uma peça, ao se estipular um poliedro regular com 6 faces, e como definição de projeto, o impeditivo de que as faces não poderiam ser quadradas.

Lógicas similares podem estar associadas à performance climática, estrutural ou estética, sempre com a possibilidade da variação. Imagine-se um projeto tendo como critério sombrear totalmente uma janela em um período do dia a partir de elementos horizontais (brise-soleil), sendo um modelo organizado a partir de duas variáveis, o tamanho e a quantidade dos elementos horizontais. Com acesso à escolha de valores das duas variáveis, o arquiteto pode decidir por uma resposta dentro do espectro de possibilidades que atendem à performance desejada, *sombrear a janela*. Deve-se compreender que as variáveis aqui estão inter relacionadas, como em qualquer



projeto paramétrico. No caso dos brises, quanto maior a quantidade de elementos menor pode ser o tamanho dos mesmos, e vice-versa, resultando em um mesmo objetivo, o sombreamento total em um dado horário específico.

Esses dois exemplos tentam ao máximo simplificar problemas encontrados para apresentar a situação. No entanto, o processo torna-se interessante a partir da complexificação da informação carregada, o *input*. Nesta mesma direção, alguns parâmetros podem inviabilizar outros e, quanto mais os problemas e o gerenciamento de soluções forem explicitados para o computador, mais agregador será o processo.

Neste nível de computabilidade todos os parâmetros são explícitos e estão organizados segundo uma hierarquia de associações geométricas (Burry, 2007) para a efetivação de uma exploração formal. No momento em que o modelo é gerado, variações contínuas podem ser produzidas, transformadas e manipuladas pelo controle dos parâmetros, permitindo um espectro de possibilidades entre a entrada (*input*) e a saída (*output*) de informações (Kotnik, 2010).

Kotnik (2010) cita como exemplo de um projeto que se desenvolve por meio de um nível de computabilidade paramétrico a obra do International Terminal at Waterloo Station projetada pelo arquiteto Nicholas Grimshaw e seus associados, situada na cidade de Londres e inaugurada em 1994.

Por meio das imagens apresentadas na Figura 4, pode-se perceber que a síntese formal é composta de um elemento estrutural que conforma a cobertura, o qual se repete 36 vezes ao longo do terminal, apresentando algumas distorções de tamanho, inclusive com modificações angulares de implantação.

O que configura este desenvolvimento como um nível de computabilidade paramétrico é a equação estabelecida para deformação com o apelo estético do segmento configurado para uma função estrutural: são 36 segmentos geometricamente distintos, mas “topologicamente idênticos” como menciona Kolarevic (2003 p. 18).

Figura 4: Esquema elaborado a partir de planta, corte e foto. Fonte: Planta, corte e foto retiradas de site do escritório, disponível em: <https://grimshaw.global/projects/international-terminal-waterloo/>. Acessado em: agosto de 2020.

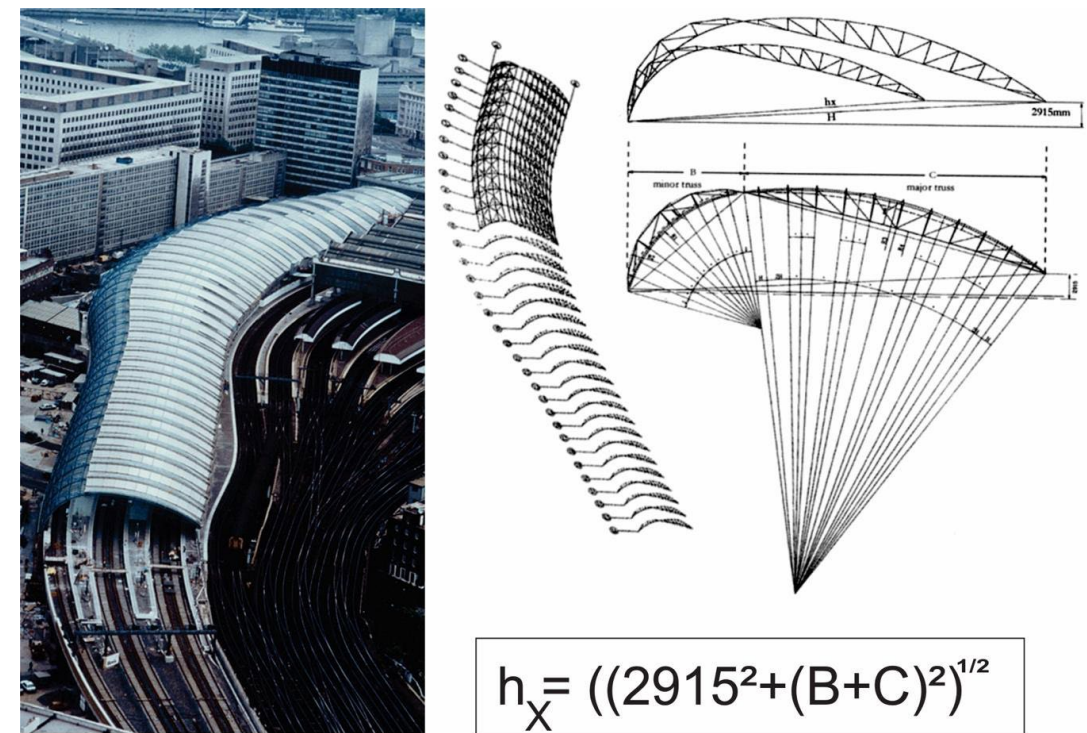
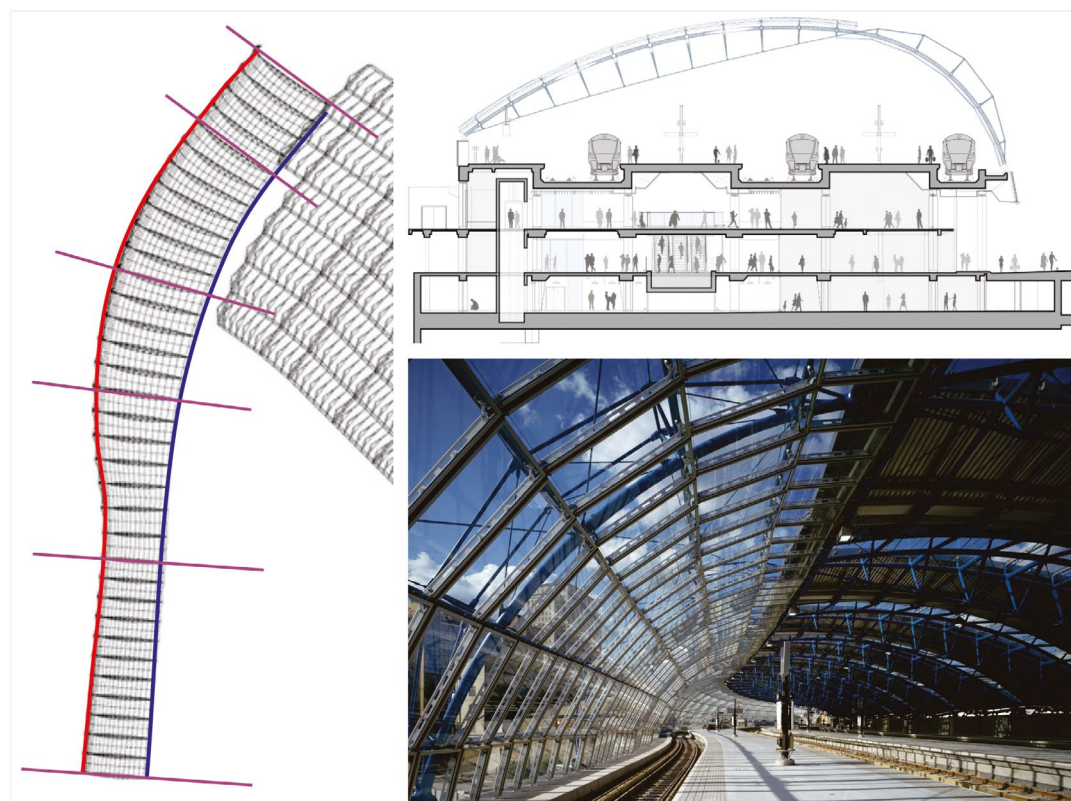


Figura 5: Explicitação formal do International Terminal at Waterloo Station. Fonte: (KOLAREVIC, 2003 p. 19) e disponível em: <https://grimshaw.global/projects/international-terminal-waterloo/>. Acessado em: agosto de 2020.

As perspectivas exploradas nas fotos apresentadas nas Figuras 4 e 5 já evidenciam claramente que estas estruturas além de diferentes não são paralelas entre si. A forma arquitetônica é desenvolvida a partir da geratriz (primeiro elemento estrutural), percorrendo as duas diretrizes, que no caso são diferentes, demarcadas em vermelho e azul à esquerda da Figura 4, e explorando a necessidade de ajustes de tamanhos.

As modificações dimensionais podem ser visualizadas geometricamente na parte superior direita da Figura 5, a qual corresponde à equação apresentada na parte inferior da mesma figura. A estrutura é composta de duas treliças, que mantêm relações dimensionais associativas entre si a partir da equação em questão, na qual o tamanho horizontal da treliça menor é dado por “B”, e o da maior é dado por “C”.

Geometricamente pode-se analisar que os dois arcos concordantes são de treliças diferentes, compostos pelo arco interno da treliça menor e pelo arco externo da treliça maior. O arco externo da treliça menor é dimensionado a partir da relação de um triângulo, cuja hipotenusa varia a partir do espaço disponibilizado entre as duas diretrizes. As alturas dos pontos da base das treliças são diferentes entre si, mas mantêm-se fixas ao longo das diretrizes. Isto é, cada diretriz tem uma altura fixa no eixo Z.

#### Nível de computabilidade Algorítmico - *Water Cube*

De início, é importante destacar que os níveis de computabilidade paramétrico e algorítmico partem da utilização do desenho paramétrico, ou seja, devem existir parâmetros que possam variar. Porém, o que difere as duas interações é que a segunda contém um processo generativo, no qual as variáveis iniciais não são diretamente proporcionais às variáveis finais (KOTNIK, 2010).

Nomeada por Oxman (2006) como interação com o ambiente digital que gera a representação digital, o nível de computabilidade algorítmico (KOTNIK, 2010) é caracterizado pela descrição formal gerada como uma estratégia de projeto,



sendo desenvolvida por meio de operações algébricas, analíticas e geométricas que resultam em uma forma arquitetônica. Nessa interação, os arquitetos têm que identificar e explicitar os critérios que deverão ser atendidos para o processo generativo ser desenvolvido. A operação neste processo é realizada por meio de um sistema generativo, assim, seu desenvolvimento parte da concatenação destas operações, que emergem em uma forma arquitetônica.

Celani, Vaz e Pupo (2013) apresentam o conceito de sistemas generativos de projeto, excluindo a ideia do vínculo obrigatório com o computador, demonstrando exemplos históricos como as *Villas Palladianas*, que espacializam uma série de regras sistematizadas por Palladio para o desenvolvimento de composições que considerava adequadas, utilizando-se de conceitos como simetria e proporção. Assim, o sistema generativo é uma aproximação que busca resolver um tipo de problema de projeto - e não um projeto específico - como no exemplo dado, no qual foram construídas diferentes *Villas* com a mesma regra, sem que elas fossem iguais entre si.

Processos de projeto que fazem uso da interação com nível de computabilidade algorítmico são, portanto, sistemas generativos mediados computacionalmente. Nestes, tanto os condicionantes do processo de projeto são explicitados por parte do arquiteto, quanto os critérios de avaliação das variantes geradas são por ele definidos.

Como o sistema generativo tem a capacidade de gerar muitas soluções, deve estar atrelado a avaliações objetivas. Essa questão pode ser delineada recuperando Mitchell (1975), que apresenta um esquema para evidenciar as possíveis relações entre três conjuntos: (U) soluções potenciais, todos os tipos de soluções, (S) soluções geradas pelo sistema, (G) goal, objetivo definido, soluções boas.

O primeiro conjunto sempre será maior ou igual aos outros. Por exemplo: quando um sistema gera todo o espaço de soluções,  $(U) = (S)$ , quer dizer que foi um processo sem critérios, logo o sistema irá gerar soluções desejáveis e indesejáveis, e será necessária uma ferramenta de análise, com critérios explícitos, para encontrar as soluções boas (G).

Pode-se se entender o nível de computabilidade paramétrico como um sistema generativo no qual o arquiteto opera por meio da manipulação das variações de soluções, estando o poder de decisão colocado na manipulação direta de um sistema pelo arquiteto. Em contrapartida, o nível de computabilidade algorítmico está condicionado a articulações indiretas, dependentes das regras definidas e análises realizadas.

Para exemplificar esta abordagem de maneira simples traz-se este exemplo: tem-se um terreno amplo (200m por 300m) com declives que variam, e se quer escolher o local da implantação de uma edificação (8m por 10m) baseado em uma exploração algorítmica utilizando-se de uma lógica de evolução. Os critérios de *evolução da espécie* correspondentes à implantação são: eixo especificado que não poderia variar mais de  $10^\circ$  para cada lado no plano (xy), que garanta a menor quantidade de aterro possível, e que o vento advindo da região sul seja atenuado pelo terreno. Assim o processo gerará inicialmente algumas propostas aleatórias, quantas o arquiteto explicitar inicialmente, e elas serão analisadas de acordo com os critérios estabelecidos. Em seguida, as "x % melhores" propostas serão cruzadas, quantas vezes o arquiteto entenda como necessário, de forma a chegar em um resultado que compatibilize da melhor forma possível as condicionantes elencadas.

Kotnik (2010) indica o projeto do Water Cube, desenvolvido pelos escritórios PTW Architects, CCDI Group, CSCEC e ARUP, ganhador do concurso para o

desenvolvimento do centro aquático dos Jogos Olímpicos de Pequim 2008, como um exemplo deste nível de computabilidade.

A partir do processo de desenvolvimento dos croquis que compõem a Figura 6 e do depoimento de um dos engenheiros da ARUP responsáveis pelo projeto (CARFRAE, 2006), verifica-se que o projeto inicia com um poliedro regular de 6 lados, os quais são respectivos ao fechamento horizontal superior, às laterais do espaço e ao piso. Este poliedro contém um poliedro menor, que realiza uma operação de subtração conforme a lógica apresentada no croqui central inferior da Figura 6. Representações dos estágios subsequentes do projeto (Figura 7) mostram ainda outras operações formais, com utilização do subsolo e subtração de mais volumes poliédricos, inclusive o de acesso.

A maior parte do programa, no caso, parque aquático, arquibancadas, e serviços está localizada neste espaço de intersecção entre os poliedros (imagem superior esquerda da Figura 7). No processo de desenvolvimento e detalhamento, este espaço foi subdividido em três grandes áreas, tendo como divisor esta malha estrutural. O espaço restante da borda foi desenvolvido como um elemento estrutural e de vedação termo acústica, concebido como uma malha tridimensional (Figura 7 – esquerda inferior e direita).

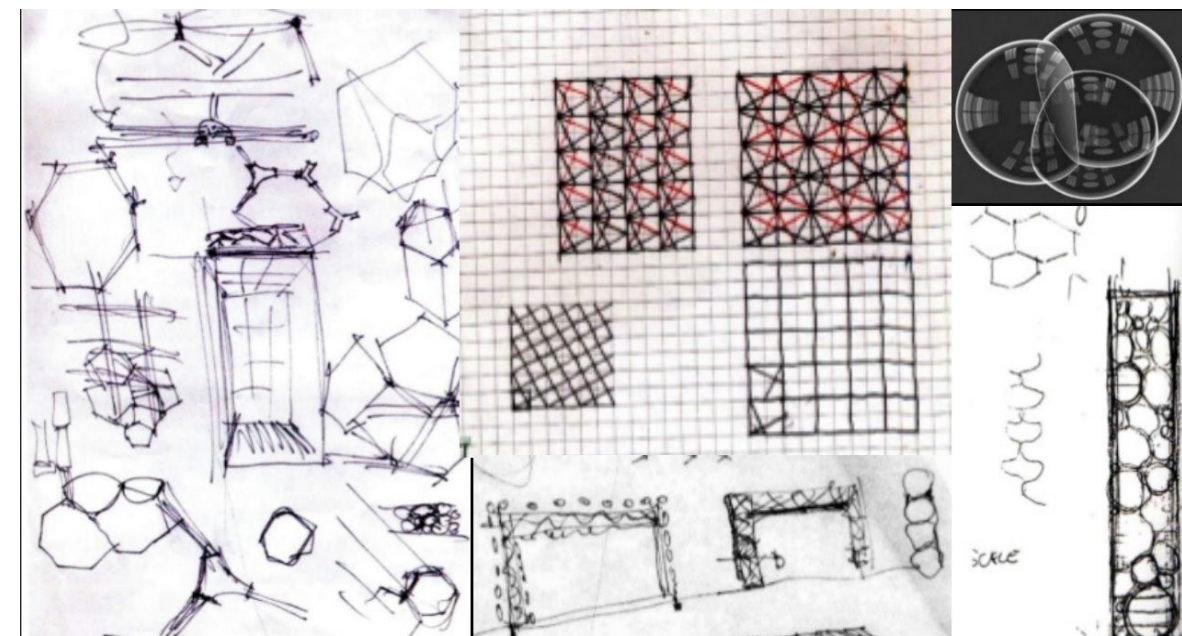


Figura 6: Croquis Water cube. Fonte: <https://es.slideshare.net/compo3T/composicion-iii-centronacional-denatacion-pekín-water-cube-isabel-martinsandonis-g42>. Acessado em: outubro de 2020.

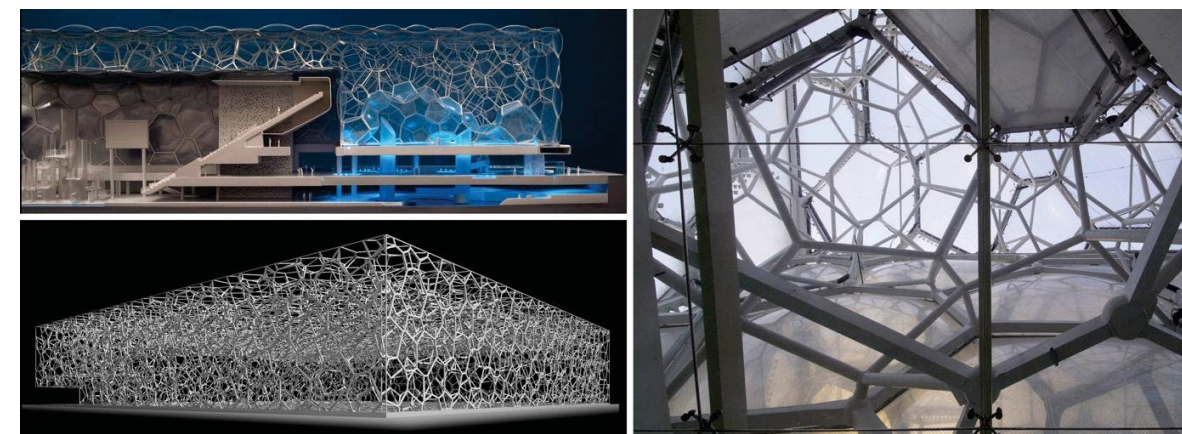


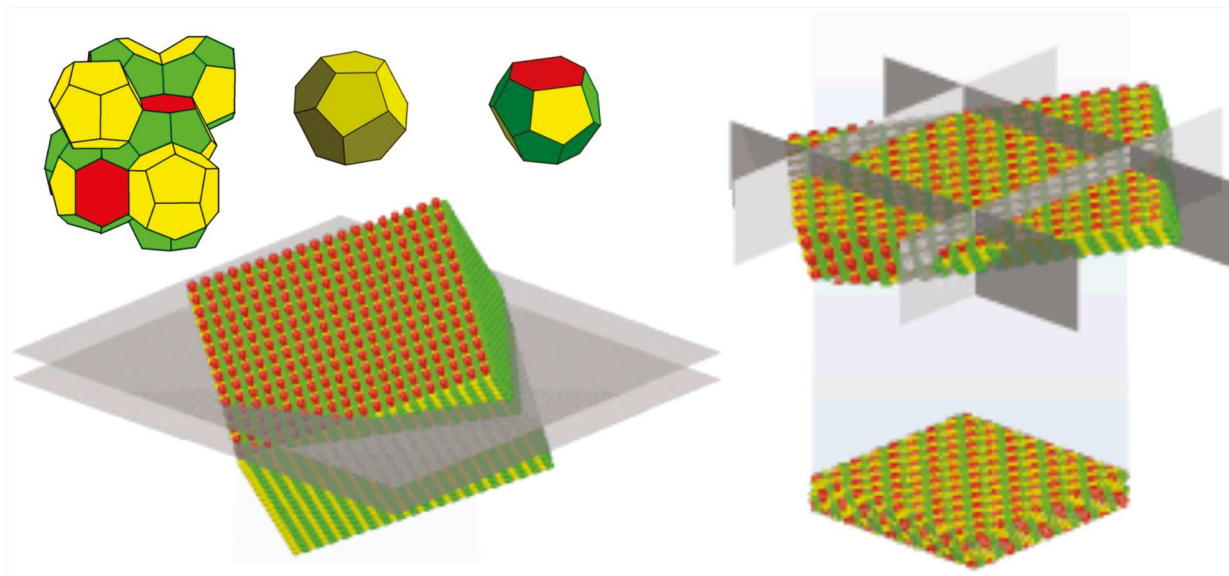
Figura 7: Imagens para apresentação do projeto com o foco na malha estrutural. Fonte: Imagens retiradas de site do escritório, disponível em: <https://www.ptw.com.au/> Acessado em: outubro de 2020.



Nas propostas esquematizadas inicialmente, a organização do espaço configurava-se a partir de malhas regulares que já indicavam uma função estrutural, como podem ser visualizadas a partir dos croquis à esquerda e na parte superior central da Figura 6, em seguida, passou-se a investigar o conceito de bolhas. Com elas foi possível trazer a irregularidade na percepção visual da fachada desta estrutura (Figura 7), e deixar passar uma luminosidade difusa para as piscinas, além de incorporar um aspecto simbólico relevante. Com esses objetivos, buscaram-se experimentações no espaço tridimensional que simulassem esta aparência a partir de uma regra. Os arquitetos encontraram nos estudos dos físicos Denis Weaire e Robert Phelan com simulações de espumas com bolhas de mesmo tamanho, realizados em 1993, um módulo composto de dois poliedros, com igual volume. O primeiro é um poliedro com 14 lados, sendo duas faces com formato hexagonal e 12 faces com formato de pentágonos (com tamanhos distintos, distinguidos com cores, na Figura 8). E o segundo, com 12 lados, é composto apenas por faces pentagonais (STOCKING, 2009).

O sólido envolvente do objeto arquitetônico já estava decidido, assim como a malha estruturadora do espaço. No entanto, a relação angular dos eixos da malha com os eixos que estruturavam o poliedro envolvente do objeto final foi desenvolvida a partir de um nível de computabilidade algorítmico.

Figura 8: Esquema da organização da malha tridimensional e da lógica formal no processo de projeto. Fonte: (CARFRAE, 2006 s. p.).



O nível de computabilidade algorítmico buscou, neste caso, a solução a partir de um processo generativo baseado em desempenho estrutural. Neste modelo foi associado um tipo de material e espessura às arestas dos poliedros, desenvolvidas posteriormente como partes das estruturas metálicas. Não foram encontradas informações na literatura se o tamanho do módulo foi tomado como uma variável estática ou dinâmica ao longo do processo, mas sabe-se que os arquitetos colocaram como restrição que o eixo da malha e do poliedro envolvente não poderiam ser iguais para trazer à fachada um aspecto de imprevisibilidade reforçando o aspecto de bolhas (STOCKING, 2009).

### Discussão e Considerações Finais

Os modos de utilização do computador em processos de projeto foram sendo modificados a partir das novas tecnologias e do aumento da capacidade de processamento de informação dos computadores pessoais. No entanto, compreende-

se que esta incorporação faz parte de um processo de mudança gradual, e que leva tempo, de fato, a repercutir na arquitetura construída, por fatores diversos que escapam ao foco deste artigo.

Normalmente, tem-se o entendimento, não sem fundamento, de que os processos projetuais que incorporam níveis de computabilidade mais avançados são orientados a obras de exceção. Em contrapartida, ações de elucidação de incorporações de níveis de computabilidade mais avançados em projetos já construídos, e que trazem visibilidade às metodologias de projeto, podem repercutir em interesse, aprendizado, apropriação e implantação em incorporações mais simples, como o exemplo das explicações brevemente apresentadas.

É importante destacar que durante o desenvolvimento deste Estudo de Caso, teve-se muito claro que a narrativa foi conduzida pelo discurso dos arquitetos e engenheiros, o qual aparenta um processo linear conduzido ao resultado final. No entanto, sabe-se que um processo projetual é mais rizomático, no qual existem várias entradas de informações (inputs) em diferentes tempos guiando a diferentes possibilidades de saídas (output) que são excluídas por questões objetivas e/ou subjetivas, e que em nenhum momento foram apresentadas ou discutidas. E, inclusive, acredita-se que estas saídas equivocadas ajudam a construir o caminho para saída final.

Observando, por exemplo, o processo de projeto do *Water Cube* pode-se perceber que o desenvolvimento da questão central se explicita desde o início, já nos primeiros croquis divulgados, indicando pela complexidade do problema a necessidade de sua resolução por meio do nível de computabilidade algorítmico de projeto. Este é um caso emblemático de que tais incorporações não precisam necessariamente estar presentes em todas as etapas de um processo de projeto. Neste caso, foram implementadas para resolver problemas específicos, como a questão estética pretendida, relativa à variabilidade formal da fachada, e conectada à uma questão de performance estrutural.

Diante da realidade contemporânea, onde existe a necessidade de enfrentamento a problemas de projeto com alto grau de complexidade, evidencia-se a potencialidade do computador como uma mídia ativa, a partir da exploração de níveis de computabilidade mais avançados. Seu potencial se mostra claramente na facilitação dos processos de geração de alternativas e de tomada de decisão, baseados em questões objetivas previamente explicitadas pelo arquiteto. Se alguns processos podem ainda ser conduzidos segundo a lógica representacional, ou processos paramétricos simples podem ser implementados analogicamente, outros seriam extremamente demorados e custosos de serem realizados dessas formas. Abrem-se, portanto, a partir da exploração do computador como mídia ativa, outras possibilidades de articulação e organização da informação em prol de resultados aprimorados, e até possivelmente não imaginados, quer para resolução de problemas específicos, quer globais de uma obra.

Tem-se claro que novas ferramentas, principalmente as que alteram modos de fazer historicamente estabelecidos, trazem desafios ao trabalho - e conseqüentemente à formação - do arquiteto, assim como à toda a cadeia produtiva da arquitetura. Nesta direção, acreditamos que um passo importante, é desmistificar esta produção, e investigações como a deste artigo podem auxiliar neste processo.

### Agradecimentos

Os autores agradecem as agências de financiamento que suportam esta investigação



assim como ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo onde está sendo desenvolvida esta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e por meio da bolsa de produtividade (CNPQ Processo 304071/2019-6).

## Referências

BRASIL. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO. Gabinete do Ministro. PORTARIA Nº 1.770, DE 21 DE DEZEMBRO de 1994, Brasília, 1994. Disponibilizado em: <https://www.jusbrasil.com.br/diarios/DOU/1994/12/23> Acessado em: março de 2020.

BURRY, Jane. Mindful Spaces: Computational Geometry and the Conceptual Spaces in which Designers Operate. *International Journal of Architectural Computing*, v.5, n.4, p. 611-624, 2007.

CARFRAE, Tristram. Engineering the water cube. *Architecture Australia*, July, 2006.  
CELANI, Gabriela; VAZ, Carlos PUPO, Regiane. Sistemas generativos de projeto: classificação e reflexão sob o ponto de vista da representação e dos meios de produção. *Revista Brasileira de Expressão Gráfica*. v. 1; n.1, 2013.

DICTIONARY. *OXFORD Advanced American Dictionary*. Oxford University Press: Oxford, 2015.

DUARTE, José; CELANI, Gabriela; PUPO, Regiane. Inserting computational technologies in architectural curricula. In *Computational Design Methods and Technologies: Applications in CAD, CAM and CAE Education*. Hershey: IGI Global, 2011, Cap. 9, p. 390-411.

Davis, Daniel. *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*. 2014, 122f. Thesis of Doctor en philosophy. School of Architecture. RMIT University.

DURAND, Jean-Pierre. *La représentation du projet*. Paris: Éditions de la Villette, 2003.

GROAT, Linda; WANG, David. *Architectural Research Methods*. 2th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

KOLAREVIC, Branco. *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*. Abingdom, Oxon: Taylor & Frances, 2003.

KOTNIK, Toni. Digital Architectural design as Exploration of computable Functions. *International Journal of Architectural Computing*, v. 8, n. 1, p. 1-16, 2010.

LAWSON, Bryan. *How designers think: the design process desmystified*. Oxford: Architectural Press, 1980.

MITCHELL, William John. *The theoretical foundation of computer-aided architectural design*: Mitchell, W. J. Environment and Planning B, v. 2 n. 2, p. 127-150, 1975.  
OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert. *Theories of the Digital in Architecture*. New York: Routledge, 2014.

OXMAN, Rivka. Performance-based Design: Current Practices and Research Issues.

*International Journal of Architectural Computing*, v. 6, n. 1, p. 01-17, 2008.

OXMAN, Rivka. Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, v. 27, Londres: Elsevier, p. 219 – 265, 2006.

PICON, Antoine. The Seduction of innovative geometries. In: OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert (Org). *Theories of the Digital in Architecture*. New York: ROUTLEDGE, 2014, Cap. 3, p. 47-54.

VASCONSELOS, Tassia Borges; SPERLING, David Moreno. From representational to parametric and algorithmic interactions: A panorama of Digital Architectural Design teaching in Latin America. *International Journal of Architectural Computing*, v. 15 n. 3, p. 215-229, 2017.

WOODBURY, Robert. *Elements of Parametric Design*. New York: Routledge, 2010.

WOODBURY, Robert. How designer use parameters. In: OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert (Org). *Theories of the Digital in Architecture*. New York: ROUTLEDGE, 2014, Cap. 10, p. 153 -170.