



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

ANDRÉ LUÍS DE ARAUJO

COMPLEXIDADE E EMERGÊNCIA
EM ESTRUTURAS ESPACIAIS

CAMPINAS
2017

ANDRÉ LUÍS DE ARAUJO

COMPLEXIDADE E EMERGÊNCIA
EM ESTRUTURAS ESPACIAIS

*Tese de Doutorado apresentada a
Faculdade de Engenharia Civil,
Arquitetura e Urbanismo da Unicamp,
para obtenção do título de Doutor em
Arquitetura, Tecnologia e Cidade, na
área de Arquitetura, Tecnologia e
Cidade.*

Orientadora: Profa. Dra. MARIA GABRIELA CAFFARENA CELANI

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
DISSERTAÇÃO OU TESE DEFENDIDA POR ANDRÉ LUÍS DE
ARAUJO E ORIENTADO PELA PROFA. DRA. MARIA GABRIELA
CAFFARENA CELANI.

ASSINATURA DA ORIENTADORA



CAMPINAS
2017

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): FAPESP, 2012/05475-4; FAPESP, 2015/01228-0

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Ar15c Araujo, André Luis de, 1981-
Complexidade e emergência em estruturas espaciais / André Luís de Araujo. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Maria Gabriela Caffarena Celani.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Computação natural. 2. Aço - Estruturas. 3. Design. 4. Arquitetura - Projetos. 5. Complexidade computacional. I. Celani, Gabriela Caffarena, 1967-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Emergence and complexity in spatial structures

Palavras-chave em inglês:

Natural computing

Steel - Structures

Design

Architecture - Projects

Computational complexity

Área de concentração: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Titulação: Doutor em Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Banca examinadora:

Maria Gabriela Caffarena Celani [Orientador]

José Luiz Antunes de Oliveira e Sousa

Wilson Florio

Arivaldo Leão de Amorim

José Manuel Pinto Duarte

Data de defesa: 09-01-2017

Programa de Pós-Graduação: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**COMPLEXIDADE E EMERGÊNCIA EM ESTRUTURAS
ESPACIAIS**

André Luís de Araujo

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Maria Gabriela Caffarena Celani
Presidente e Orientadora/Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. José Luiz Antunes de Oliveira e Sousa
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Wilson Florio
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Arivaldo Leão de Amorim
Universidade Federal da Bahia

Prof. Dr. José Manuel Pinto Duarte
Universidade da Pensilvânia

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 09 de Janeiro de 2017

Agradecimentos



Aos meus pais, Divino e Lúdia

Agradecimentos



*Gostaria de expressar meu sincero agradecimento
ao Royal Melbourne Institute of Technology
por me receber durante o período de intercâmbio.*



*E ao suporte financeiro da Fundação de Amparo
à Pesquisa do Estado de São Paulo por meio das
concessões: 2012/05475 e 2015/01228-0.*

Agradecimentos

À Orientadora:

Dra. Gabriela Celani, UNICAMP

À Supervisora do período de intercâmbio:

Dra. Jane Burry, RMIT University

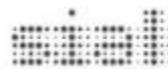
Existem muitas pessoas, às quais eu gostaria de agradecer pelo suporte e ajuda durante os anos que passei na UNICAMP e no RMIT. Algumas delas estão aqui, em ordem alfabética:

Affonso Orciouli, Alex Garcia, Ana Cuperschimid, Ana Goes, Anne Save De Beaurecueil, Antônio Bittencourt, Antônio Tibiriçá, Aroldo Dias Cancio, Cecília Zorzon, Daniel de Carvalho Moreira, Daniel Prohasky, Doris Kowaltowski, Ernesto Bueno, Fábio Azevedo, Fernando Nakandakare, Fernando Silva, Filipe Tricoli, Flávia Cavalcanti, Franscesc Salla, Gabriela Máximo, Gonçalo Castro Henriques, Gustavo de Souza Veríssimo, Hugo Mulder, Iara Cunha, Jarryer De Martino, José Luiz Rangel Paes, José Nuno Beirão, José Pinto Duarte, Leticia Mendes, Luciana Fernandes, Luiza Soares, Maja Zeller, Marcela Balieiro, Maria Clara Cavalini Pinto, Milena Valenti, Nicholas Williams, Pedro Veloso, Rafael Barban, Rafaella Rêllo, Rafael Marengoni, Regina Coeli Ruschel, Regina Tirello, Renata Vieira, Romeu Neiva, Rone Beco, Rosângela Farias, Sebastião Souza, Sergio Souza Queiroz, Silvia Mikami Pina, Solange Lisegle Schulz Staut, Underléia Bruscato, Victor Sardenberg, Wilson Barbosa Neto.



Lab. Automação e Prototipagem para
Arquitetura e Construção
lapac.fec.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas
Av. Saturnino de Brito Campus Zeferino Vaz
CEP: 13083-852
Campinas, São Paulo, Brasil



Spatial Information
Architecture Laboratory
www.sial.rmit.edu.au

Royal Melbourne Institute of Technology
Design Hub, Building 100
Corner Victoria and Swanston Sts Carlton VIC 3000
Melbourne, Victoria, Australia

RESUMO

Em alguns contextos, a complexidade representa a qualidade do que é confuso, embaraçado e de difícil apreensão. No entanto, existe uma categoria de problemas científicos relacionados à complexidade organizada, nos quais ferramentas como a Estatística e a Computação Científica podem auxiliar no entendimento dessa organização. Algumas dessas ferramentas são inspiradas em teorias provenientes da Biologia, como os algoritmos evolucionários e a vida artificial. Em design computacional, os mesmos conceitos são utilizados para a geração de formas e estruturas, principalmente quando existe a intenção em simular essa complexidade. Nesse contexto, existem duas abordagens possíveis: a top-down, em que processos de otimização podem ser iniciados com uma forma complexa e estruturalmente ineficiente, para então, se buscar a eficiência por meio do refinamento progressivo da solução; a bottom-up, na qual componentes elementares (agentes) se auto organizam em um processo que subtende um nível de consciência que culmina na emergência de complexidade. Atualmente, as propostas científicas têm se valido mais dos processos de otimização da forma global do que de interação entre componentes elementares, uma vez que estes últimos são comumente padronizados e, por causa disso, recebem críticas sobre a sua limitação da liberdade formal. Partindo da hipótese de que a construção de um sistema bottom-up, com a variação paramétrica de componentes, permite chegar na mesma liberdade formal dos processos top-down, mas com as vantagens da auto-organização, esta pesquisa tem como objetivo propor um método generativo para o design de estruturas espaciais fundamentado nos conceitos de complexidade e emergência. Como método serão identificadas regras em estudos de caso e, a partir de sua síntese e implementação em rotinas de programação, será desenvolvido um algoritmo baseado no método incremental tal como descrito na computação científica. As estruturas geradas serão submetidas a métodos experimentais físicos e computacionais para a verificação de aspectos produtivos relacionados a exequibilidade. Dentre os resultados, espera-se propor um novo método para o design de estruturas espaciais complexas.

Palavras-Chave: Sistemas generativos. Autômatos Celulares. Design Estrutural. Emergência. Abordagem de projeto bottom-up.

ABSTRACT

Sometimes, complexity refers to confusion, embarrassment and difficulties of understanding. However, there's a kind of scientific problems related to organized complexity wherein statistics and computation tools can help to identify essential features of their organization. Some of these tools are inspired by theories from biology such as evolutionary algorithms and artificial life. In computational design, the same concepts are used in structural form-finding processes, in order to simulate this complexity. In this context, there are two design approaches: top-down, in which the design process begins with a complex and structurally inefficient shape, which is refined with the use of optimization techniques; and bottom-up, in which the design process begins with components (agents) whose self-organization results in emergent complexity. The former approach is usually more commonly used than the later, because components are usually standardized, and this represents a limitation in the form-finding process. Assuming that the use of parametric components to construct a bottom-up generative system allows the same formal freedom of top-down approach, but with the advantages of self- organization, this research aims to propose a design method for spatial structures based on concepts of emergence and complexity. Our research method consisted on identifying and compiling rules from case studies to develop a generative design algorithm. After that, we have evaluated the resulting designs in terms of assembly and feasibility, through physical experiments and computational simulations. As a result, we expected to propose a new method for generating the design of complex spatial structures.

Keywords: Generative systems, Cellular automata, Structural design, Emergence, Bottom-up design approach

Sumário

Capítulo Um: Introdução	12
1.1 PRESSUPOSTO E HIPÓTESE	23
1.2 OBJETIVOS	23
1.3 MOTIVAÇÃO	24
Capítulo Dois: Complexidade, emergência, bioinspiração e arquitetura	26
2.1 COMPLEXIDADE E EMERGÊNCIA.....	27
2.2 MODELAGEM ARTIFICIAL DO CONCEITO DE EMERGÊNCIA.....	32
2.3 FUNDAMENTOS DOS AUTOMATOS CELULARES UNIDIMENSIONAIS	46
2.4 AUTÔMATOS CELULARES BIDIMENSIONAIS E O JOGO DA VIDA	55
2.5 APLICAÇÕES DOS AUTÔMATOS CELULARES NO DESIGN COMPUTACIONAL.....	62
Capítulo Três: Estruturas espaciais: design, evolução e perspectivas	72
3.1 BREVE EVOLUÇÃO DAS ESTRUTURAS ESPACIAIS	73
3.2 DESIGN DE ESTRUTURAS ESPACIAIS COMPLEXAS: ESTADO DA ARTE	94
Capítulo Quatro: Materiais e Métodos	109
4.1 REQUISITOS, ANÁLISE E PLANEJAMENTO.....	111
4.2 IMPLEMENTAÇÃO E DESENVOLVIMENTO	114
4.3 AVALIAÇÃO, TESTES E VALIDAÇÃO.....	116
Capítulo Cinco: Estudos de caso	119
5.1 WATERCUBE.....	121
5.1.1 Geometria e Estrutura	123
5.1.2 Processo alternativo para o design do Watercube.....	130
5.2 FEDSQUARE	141
5.2.1 Geometria e Estrutura	144
5.2.2 Processo alternativo para o design do Fedsquare.....	151
Capítulo Seis: Design estrutural bottom-up	163
6.1 DEFINIÇÃO DO BLOCO ELEMENTAR.....	165
6.1.1 Implementação computacional.....	167
6.2 RESTRIÇÕES DA FORMA.....	174
6.2.1 Implementação computacional.....	176
6.3 ANÁLISE ESTRUTURAL NOS ESTÁGIOS INICIAIS DO PROCESSO DE PROJETO.....	180
6.3.1 Implementação computacional.....	181

Capítulo Sete: Geração de estruturas	190
7.1 VALIDAÇÃO.....	191
7.1.1 Exercício nº 1.....	195
7.1.2 Exercício nº 2.....	199
Capítulo Oito: Conclusão	204
Referências	209
Anexo A	222
Anexo B	231

Capítulo Um

Introdução



Arquitetos tendem a desenhar o que são capazes de construir e a construir o que são capazes de desenhar.”

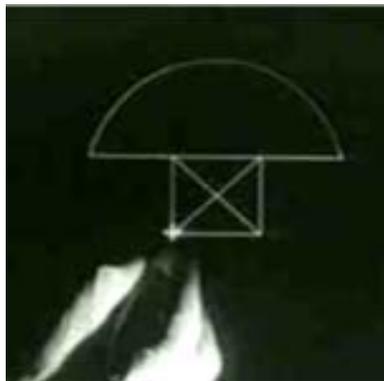
——— WILLIAM MITCHELL, 2001

Trecho do texto Roll Over Euclid: how Frank Gehry designs and builds

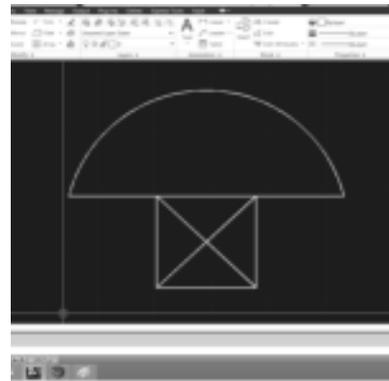
A computação gráfica é, ao mesmo tempo, matemática e arte. É uma ferramenta de concepção de arte, assim como um piano ou um pincel e proporciona a representação de imagens complexas em esferas multidimensionais a partir de equações e abstrações. Recriar relações como luz, tempo e movimento constitui a base dessa arte que pode entendida como uma arte tecnológica, que permite ao artista transcender as técnicas tradicionais de desenho e modelagem. Há bem pouco tempo, algumas representações que exigiam técnicas apuradas de desenho, atualmente podem ser geradas com o auxílio dos aplicativos computacionais e, assim, grande parte da ideia do artista sobre sua arte é concretizada pela capacidade de processamento das máquinas (AZEVEDO e CONCI, 2003).

Parece existir um consenso entre os pesquisadores da Ciência da Computação sobre o primeiro computador a possuir recursos gráficos para a visualização de dados numéricos: o *Whirlwind I*, desenvolvido no MIT nos anos 1950. Motivado por propósitos militares, esse equipamento

convertia informações capturadas por radares em imagens e, desse modo, o usuário poderia apontar os pontos suspeitos na tela com uma caneta óptica. Esse invento motivou o pesquisador Ivan Sutherland a desenvolver uma das mais importantes publicações da computação gráfica doze anos depois, a tese intitulada *Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System*, na qual foram introduzidas estruturas de dados para o armazenamento e a replicação de componentes gráficos com as mesmas técnicas de interação que usavam a caneta óptica para desenhar, apontar e escolher alternativas. Até os dias atuais algumas aplicações nos sistemas CAD¹ são similares as do *Sketchpad* (Figura 1).



b. Tela do *Sketchpad*, 1963.
Fonte: <http://youtomb.mit.edu>



a. Tela do AutoCAD 2013.
Fonte: ilustração nossa.

Figura 1: Cinquenta anos dos aplicativos CAD.

O *Sketchpad* chamou a atenção das indústrias automobilísticas e aeroespaciais norte americanas e os mesmos conceitos propostos por Sutherland foram utilizados no precursor dos aplicativos CAD, desenvolvido pela General Motors em 1965. Logo em seguida, diversas outras corporações seguiram o mesmo exemplo e já no fim da década de 1960 praticamente toda a indústria automobilística e aeroespacial utilizava os aplicativos CAD, que adentraram também os escritórios de arquitetura e engenharia pouco tempo depois. Dessa época, duas práticas fundamentais se consolidaram na cultura do CAD (GERO, 1996): 1) a representação da geometria de objetos acompanhada da automatização de tarefas repetitivas; 2) o uso da computação nos processos de síntese do *design*. Enquanto o primeiro se popularizou amplamente nos escritórios, por meio de aplicativos comerciais, o último se restringiu a experimentações e aplicações específicas. Em ambas as práticas, observaram-se procedimentos de geração de formas a partir do estabelecimento de regras, denominados então, como generativos.

¹ Sigla que significa projeto assistido por computador, do inglês Computer-Aided Design.

Mitchell (1990) descreveu progresso do *design* nas plataformas CAD e observou a consolidação de cinco gerações desde o nascimento da primeira, na década de 1960. Nos anos 1970, com o surgimento dos microcomputadores de 16-bit, a comercialização da 2ª geração de sistemas CAD se valeu dos sistemas *turnkey*, nos quais os aplicativos foram vendidos juntamente com o *hardware*, o que tornou sua aquisição onerosa. Por conta disso, a utilização do CAD na construção civil ficou restrita a algumas obras públicas e aos grandes escritórios, operados principalmente por técnicos treinados. Já os anos 1980 marcariam o desenvolvimento paralelo de três gerações: a 3ª, uma continuação natural das duas anteriores, com a utilização dos 32-bit super-minis; a 4ª, uma simplificação do CAD para a sua utilização nos recém-lançados *Personal Computers* (PC's) 16-bit IBM e Apple Macintosh, tornando-o acessível a escritórios menores; e a 5ª, o desenvolvimento do CAD para as *Workstations*, com capacidade gráfica para o processamento de modelos 3D.

A 4ª geração, em especial, é apontada por Mitchell como um ponto de inflexão na história do CAD, já que a simplificação dos sistemas provocou uma mudança radical em sua cultura. De acordo com o autor, esse momento determinou um novo padrão de uso para CAD, de aplicações muito mais voltadas às representações técnicas, do que sua utilização como ferramenta generativa. Se por um lado a simplificação dos sistemas CAD tornou-o popular entre os escritórios, por outro, suas aplicações para a geração de formas ficaram restritas às pesquisas acadêmicas e às grandes indústrias e escritórios. A partir de então, a maioria dos arquitetos passou a utilizá-lo como uma prancheta virtual e, para Mitchell, esse momento representou também a perda de uma ampla gama de possibilidades.

Celani (2002) identificou mais três gerações de CAD posteriores à 5ª geração. No início dos anos 1990, a introdução da modelagem 3D, dos sistemas de comunicação e das *renderizações*, passaram a figurar nos escritórios a partir do aprimoramento dos microprocessadores. Além disso, as novas interfaces de CAD basearam-se em ambientes colaborativos a partir dos anos 2000, utilizando a transmissão de dados via internet. No campo da arquitetura, engenharia e construção, a colaboração remota abriu caminho a implementação concreta de procedimentos de gestão de representações digitais, descritas anos antes por autores como Eastman (1975). As plataformas atuais para *Building Information Modeling* (BIM) passaram a contar com a troca virtual de informação, a fim de nutrir modelos digitais com características físicas e funcionais oriundas do trabalho de profissionais de diversas áreas. Desse modo, questões de operacionalidade, manutenção e infraestrutura puderam ser mais fortemente incluídas na gestão de projetos e no ciclo de vida das construções (*Quadro 1*).

Quadro 1: Oito gerações do Computer-Aided Design

	60's	70's	80's	90's	00's
Aplicativos CAD	63: <i>Sketchpad</i>	2 ^a Geração Sistemas personalizados, CAD para o planejamento espacial e otimização	3 ^a Geração 32-bit super- minis	6 ^a Geração Modelagem, renderização animação, aplicações especiais	8 ^a Geração Internet- como base CAD, novas interfaces
	1 ^a Geração CAD para as indústrias automobilis- tica e aeroespacial	68-72: Arch machine	4 ^a Geração Simplificação para 16-bit PC's 5 ^a Geração Workstations	7 ^a Geração "Faça você mesmo" CAD	9 ^a Geração Cápsulas gráficas contendo <i>scripts</i>

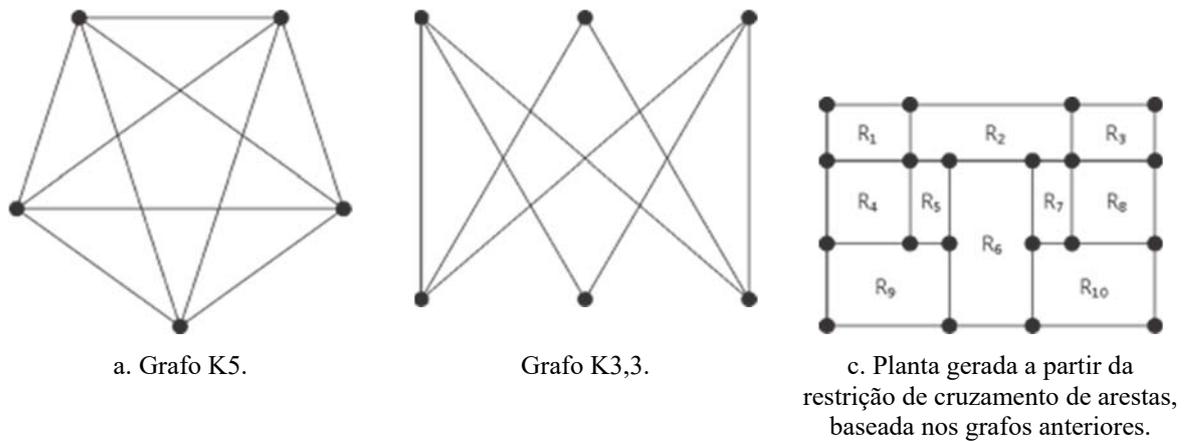
Fonte: Adaptado de Celani (2003).

Algumas das aplicações generativas do CAD observadas desde os anos 1960 buscaram implementar teoremas matemáticos para a geração de formas nos ambientes gráficos. O teorema de grafos planares proposto por Kuratowski na década de 1930 orientou, por exemplo, a determinação automatizada da divisão de ambientes em edificações. Na teoria de Kuratowski, um grafo planar pode ser representado no plano, de tal modo que suas arestas não se cruzem. Restrições no cruzamento de arestas baseadas nos grafos completos do tipo K_5 (*Figura 2a*) e $K_{3,3}$ (*Figura 2b*), foram utilizadas para gerar a divisão de uma região plana em sub-regiões retangulares, cujas arestas jamais se cruzassem. Desse modo, a partir da especificação de dados numéricos, como a área de cada região, uma planta de arquitetura poderia ser gerada automaticamente (*Figura 2c*), na qual os segmentos representavam divisões de parede e as áreas representavam um programa de necessidades (MITCHELL, 1977).

Implementações desse tipo começaram a aparecer com mais frequência nos escritórios de arquitetura na década de 1980, promovidas por arquitetos como Peter Eisenman e Greg Lynn. Esses arquitetos sugeriram o uso de algoritmos, em detrimento das formas clássicas de desenho técnico, para a definição das estruturas do espaço arquitetônico. Para Eisenman (1996), a utilização da projeção planimétrica² na arquitetura representava uma visão problemática, principalmente por obrigar o entendimento do espaço tridimensional em duas dimensões. A proposta de uma arquitetura algorítmica foi, em alguma medida, um reflexo das transições das

² Neste caso, Peter Eisenman se refere à técnica de projeções cilíndricas ortogonais nos planos horizontal e vertical, oriunda da Geometria Descritiva e de uso amplamente difundido nos processos de representação gráfica em Arquitetura.

plataformas mecânica para eletrônica, do mesmo período. Além das mudanças nas noções cartesianas, os algoritmos impactariam também os mecanismos de compreensão da arquitetura.



*Figura 2: Utilização generativa nos aplicativos CAD no início da década de 1970.
Fonte: Mitchell (1977).*

Embora a popularização da noção algorítmica nos aplicativos CAD tenha se tornado mais evidente na década de 1980, alguns eventos transformaram de fato sua cultura dessa a partir do fim década de 1990. Dentre eles, a aquisição da linguagem de programação *AutoLisp* pela empresa Autodesk, rebatizando-a de *VisualLisp*, deflagrou uma clara tendência a vinculação do CAD ao ambiente dos scripts (AUTODESK, INC., 2014). Em 1997, o *VisualLisp* passou a ser comercializado com um *add-on* para o aplicativo gráfico AutoCAD 14, sendo definitivamente incorporado à versão do AutoCAD 2000, lançada em março de 1999. Desde então, empresas de aplicativos gráficos passaram a investir nessa e em outras linguagens de programação como a Visual Basic, as linguagens C e as plataformas .NET, promovendo a interpretação instantânea dos *scripts* dentro das plataformas de desenho.

Provavelmente o investimento nos *scripts* para aplicativos CAD teria continuado sua trajetória, não fosse uma descontinuidade tecnológica, que também pode ser entendida como um ponto de inflexão na cultura do CAD. Essa mudança ocorreu a partir da proposta de uma representação visual dos *scripts*, que passaram a ser incluídos nos aplicativos CAD como cápsulas visuais³. O primeiro aplicativo a promover esse tipo de ambiente de desenvolvimento foi o *Generative Components*, que funcionou como extensão do aplicativo *Microstation* (BENTLEY INC., 2014). A primeira versão lançada em 2003 inaugurou a utilização de deslizadores gráficos contendo intervalos numéricos, os quais poderiam ser atribuídos aos parâmetros dos operadores. Estes últimos, por sua vez, podem ser entendidos como porções de *scripts*

³ Elemento gráfico que representa uma porção de *scripts* contendo métodos computacionais.

agrupadas em cápsulas gráficas, com a finalidade de executar métodos computacionais. Desse modo, uma sequência de ações comumente descrita por *scripts* textuais pôde ser operacionalizada de maneira simbólica, ligando graficamente parâmetros a operadores. Esse tipo de construção virtual, baseada em informações numéricas variáveis, ficou conhecida como modelagem paramétrica (*Figura 3*).

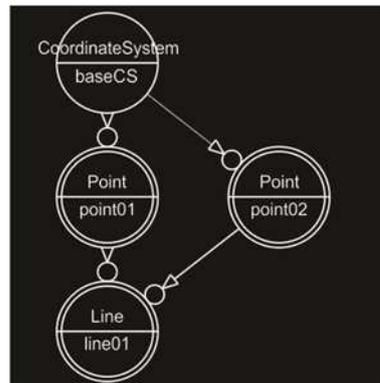


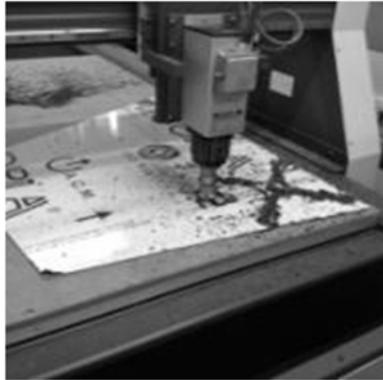
Figura 3: Display simbolic view do aplicativo Generative Components com dois parâmetros da classe point alimentando o operador line para a construção de um segmento de reta.
Fonte: ilustração nossa.

Mais ou menos simultaneamente aos avanços da modelagem computacional, as tecnologias de fabricação por controle numérico computacional em plataformas *Computer-Aided Manufacturing*⁴ começaram a impactar fortemente o *design* de edifícios e as práticas construtivas. Na Arquitetura, a associação entre variação paramétrica e a fabricação digital surgiu como uma alternativa à racionalidade oriunda das indústrias automotiva, aeroespacial e naval, possibilitando a abertura de novos horizontes projetuais. A apropriação desses meios conferiu outro significado à complexidade formal, já que a projeção e produção de geometrias extremamente difíceis e onerosas puderam ser facilitadas e também viabilizadas. A partir desse momento, as relações entre projetistas e produtos foram alteradas pela relação direta entre modelos gráfico e de fabricação (ROTHEROE, 2000).

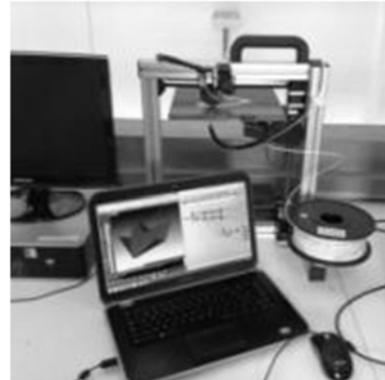
Segundo Kolarevic (2003), essas novas relações representaram uma reaproximação dos arquitetos de seus ofícios, já que, anteriormente à Era Industrial, a produção artesanal subentendia uma produção personalizada. Na atual conjuntura digital, a manipulação da mesma informação nos processos de modelagem e fabricação tem tornado muitas vezes a produção intermediada por desenhos desnecessária. Além dos aspectos produtivos, a integração presciente entre a modelagem e a fabricação permitiu a exploração de formas (*form-finding*)

⁴ Também conhecido pela sigla CAM.

suportada por processos similares aos quais as mesmas seriam produzidas, com técnicas idênticas às utilizadas nas indústrias. Nesse contexto, a produção quase que instantânea de protótipos físicos em escala representou um mecanismo de *feedback*, em tempo real, da concepção em relação à exequibilidade prática (*Figura 4*).



a. Usinagem em fresadora CNC.



b. Impressão 3D.

Figura 4: Dois dos processos utilizados para a exploração da forma a partir de técnicas digitais de prototipagem. Fonte: ilustração nossa.

A utilização de técnicas de fabricação digital no processo de projeto reiterou a pesquisa por soluções formais tradicionalmente utilizadas nas obras de arquitetos ao longo do século XX, como Antoni Gaudí, Heinz Isler e Frei Otto. Na opinião de Burry e Burry (2012), a modelagem e fabricação digitais recompensaram os esforços desses arquitetos que, de modo vanguardista, incluíram métodos formais investigativos em seu repertório. As recompensas em incorporar a linguagem das máquinas aos processos de projeto vão muito além de uma mudança de protocolo, abrem um novo contexto espacial e temporal para uma arquitetura desprovida de restrições cartesianas. A magnitude dessa mudança pode ser equiparada a introdução dos métodos matemáticos que transformaram linhas retas de projeto em curvas e superfícies. Do mesmo modo agora, pode-se dizer que existe uma nova matemática da arquitetura.

Nos projetos de geometria convencional, a divisão entre a representação física e digital pode não ser problemática. No estágio de desenvolvimento atual dos aplicativos CAD, é possível obter representações praticamente perfeitas de objetos planos e ortogonais, com grande afinidade entre as formas digitais e físicas. No entanto, o papel do modelo físico em projetos de elevada complexidade é profundamente mais preponderante. Em alguns casos, os modelos físicos são os contornos preliminares para o desenvolvimento da forma e a representação digital serve para capturar as intenções projetuais expressas no modelo físico. Nesses casos, a transição entre os modelos virtuais e físicos necessitam de condições de controle muito mais rigorosas.

Provavelmente, o exemplo mais contundente dessa prática é o método de projeto proposto desde a década de 1990, pelo arquiteto canadense Frank Gehry. Na arquitetura de Gehry, o modelo físico não representa simplesmente a geometria em uma dada escala. Os materiais e técnicas utilizados têm associação direta com a construção do edifício. No desenvolvimento projetual as definições construtivas são obtidas a partir de relações entre modelos físicos e digitais e a integração entre esses modelos se dá, primeiramente, pela captura da forma para os ambientes computacionais (*Figura 5a*). A partir daí a busca por soluções exige esforços substanciais dentro das plataformas paramétricas de CAD. Nas soluções estruturais, por exemplo, é necessário a definição de malhas, a constante otimização estrutural e a busca pela padronização de elementos, em um processo entendido como uma pós-racionalização (*Figura 5b*). O resultado é a adequação da estrutura à geometria das formas gerando um sistema estrutural de elevada complexidade (*Figura 5c*).

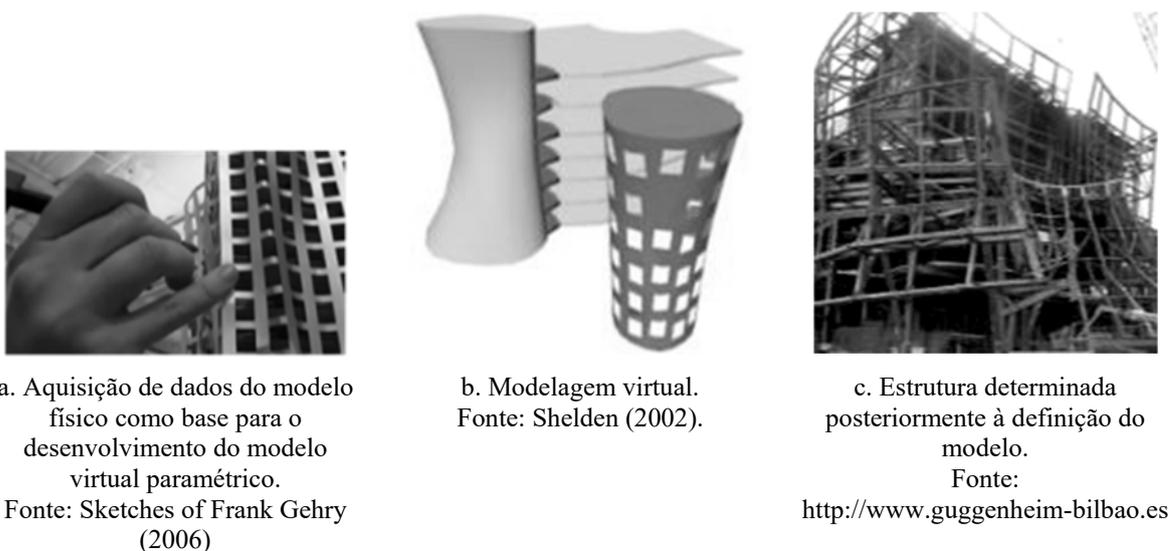


Figura 5: Características do processo de projeto de Gehry.

Em um estudo aprofundado dos métodos de projeto de Gehry, Shelden (2002) concluiu que o processo permite avaliações críticas a todo o momento. Ao mesmo tempo, a definição de qualquer estrutura formal, descrita de maneira inequívoca pelo modelo físico, não só define um espectro inequívoco de intenções projetuais, mas também impõe limites. Uma compreensão clara das técnicas de programação aplicadas a modelagem computacional permite alcançar aplicações inexploráveis pelos métodos tradicionais, que utilizam projeções cilíndricas ortogonais. Por outro lado, quando estas técnicas são aplicadas à revelia de regras de estruturação, sua utilização em ambientes de projeto pode se tornar lenta e desvantajosa.

Os esforços dos arquitetos em expressar estruturas de elevada complexidade não se concentraram somente nas técnicas que envolvem a apreensão computacional de modelos físicos. Com base em outras abordagens de projeto, que sugerem estabelecer relações entre os componentes elementares de um modelo, outras maneiras de explorar a solução se tornaram possíveis. O tratamento dessas relações por equações matemáticas permitiu que qualquer elemento pudesse ser alterado e regenerado automaticamente, da mesma maneira que uma planilha recalcula automaticamente alterações numéricas. Desse modo, o modelo paramétrico permitiu um dinamismo em virtude de sua constante sensibilidade à mudança, permitindo a produção de formas complexas investindo na adequação constante de seus componentes.

Um exemplo claro dessa abordagem foi apresentado pelo arquiteto Norman Foster no projeto do edifício Swiss Tower, em Londres, posteriormente apelidado de *gherkin*⁵. Nesse edifício, a ideia consiste na definição de um círculo controlado por funções trigonométricas. Com a adição de incrementos a essas funções, gerou-se uma espiral de raio variável. A partir daí diversos parâmetros foram atribuídos à geometria, como a quantidade de pontos ou altura da espiral, a fim de manipulá-la em diversas situações (*Figura 6a*). Os pontos da espiral serviram de base para a exploração de diversas configurações para uma estrutura diagonal (*diagrid*), a qual pôde ser determinada a partir de questões de desempenho, principalmente relacionada a aspectos aerodinâmicos (*Figura 6b*). O resultado foi uma torre baseada na espiral, cujo raio aumenta proporcionalmente com a altura e, em seguida, se afunila para o vértice (*Figura 6c*).

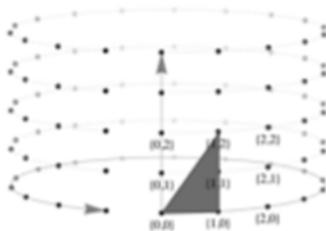
Processos como os descritos caracterizam duas correntes distintas no campo investigativo do *design* de arquitetura, em que as soluções são obtidas por maneiras diferentes de delinear os problemas de construção do espaço arquitetônico. Rowe (1987) propõe representações para esses problemas, por meio de árvores de decisão e essas árvores caracterizam duas abordagens fundamentais nos processos de *design*:

- A abordagem *top-down* (ou decomposição hierárquica) consiste, essencialmente, na quebra de um sistema, a fim de obter ideias sobre os subsistemas de sua composição. Nessa abordagem, uma visão geral do sistema é formulada a priori, especificando alguns subsistemas, mas não os esmiuçando em um primeiro momento. Cada subsistema é então refinado em níveis maiores de detalhe (como em uma ampliação), até que todas as especificações sejam reduzidas a elementos singulares. Desse modo a

⁵ Pepino. Tradução nossa.

solução é dirigida de maneira descendente, criando uma tendência a subdivisão do problema inicial em vários subproblemas.

- A abordagem *bottom-up* (ou decomposição-recomposição hierárquica) consiste, essencialmente, na reunião de sistemas, a fim de dar origem a um sistema de ordem maior. Nessa abordagem, os elementos singulares individuais são especificados detalhadamente a priori para, então, se conectarem formando subsistemas maiores. Estes, por sua vez, são também conectados, e a sequência segue até que o sistema completo de nível superior seja formado. Desse modo a solução é dirigida de maneira ascendente, criando uma tendência a solução do problema inicial, a partir da solução de vários subproblemas.



a. Espiral controlada por parâmetros variáveis.
Fonte: blog.wolfram.com



b. Exploração de malhas diagonais com base em aspectos de desempenho.
Fonte: blog.wolfram.com



c. Swiss Tower, em Londres, Foster + Partners, 2003.
Fonte: www.buildingthegherkin.com

Figura 6: Características do processo de projeto de Foster.

Embora todo processo de projeto envolva características de ambas abordagens, em maior ou menor grau, é possível dizer que a abordagem proposta por Gehry é predominantemente *top-down*, por partir de uma solução global para, então, solucionar problemas menores advindos dessa solução. Por outro lado, a proposta da Foster busca solucionar previamente problemas relacionados aos elementos singulares, de modo que a solução gerada é função dessas soluções. Em ambos os processos existem possibilidades e limitações, as quais podem ser ilustradas por um exemplo simples:

- Ao se tentar alocar tijolos de dimensões padronizadas em 1 metro linear pode existir a dificuldade de se obter a dimensão precisa, caso os tijolos não fossem divisores exatos dos 100 centímetros. Provavelmente seriam necessárias quebras (ajustes) nos tijolos, a fim de conformá-los à dimensão desejada (*top-down*).

- Por outro lado, se padronizássemos os tijolos em um divisor exato de 100 centímetros, como 20 centímetros, utilizando 5 tijolos obteríamos rigorosamente 1 metro. Contudo existe sempre a limitação de dimensional dos múltiplos de 20 centímetros e, portanto, são necessários muitos tipos de tijolo a fim de contemplar todas as situações (*bottom-up*).

Em um curso aberto do MIT, esses processos são ilustrados de maneira didática, na qual se estabelecem analogias dos processos *top-down* e *bottom-up* com os brinquedos infantis Playmobil e Lego, respectivamente (*Figura 7*). No primeiro, a brincadeira começa com formas definidas e estabelecidas, embora os detalhes das organizações singulares ainda sejam desconhecidos. No segundo, a brincadeira tem elementos básicos com possibilidades de conexões que darão origem às formas finais (SASS, 2014).



a. Playmobil: *top-down*.

Fonte: <http://www.playmobil.com>



b. Lego: *bottom-up*.

Fonte: <http://www.lego.com>

Figura 7: Analogias entre abordagens de projeto e brinquedos infantis.

Diversas possibilidades podem ser exploradas no universo das abordagens *bottom-up*, a partir da manipulação de componentes básicos, nas quais as formas globais emergem do conjunto de elementos. De acordo com Kilian (2006), a gama de exploração em um universo como esse é muito limitado, mas o resultado da interação de elementos locais oferece uma ferramenta poderosa no controle de geometrias complexas, principalmente com elevada quantidade de componentes. Os graus de liberdade de um sistema *bottom-up*, que são bem inferiores as de um sistema *top-down*, tem relação direta com a lógica de montagem do sistema. Esse tipo de montagem requer explorações formais alternativas, dentro de uma gama de restrições impostas aos componentes básicos.

Dentro desse contexto, esta pesquisa propõe investigar a possibilidade de geração de estruturas espaciais de elevada complexidade, sob a perspectiva da abordagem *bottom-up*, utilizando para isso noções oriundas do Design Computacional generativo e estratégias de exploração formal.

Apoiando-se na noção biológica de complexidade, estruturou-se uma investigação de caráter exploratório, da qual se utilizam conceitos do ramo da computação inspirada em processos naturais, a fim de investigar a validade da hipótese proposta. Visando construir contornos e propor um método para esta investigação científica, propõem-se uma discussão sobre os temas complexidade e estruturas nos próximos capítulos, fundamentando-se na construção desses conceitos ao longo do século XX e em seu impacto atual no estado da arte atual da ciência e tecnologia da área.

1.1 PRESSUPOSTO E HIPÓTESE

Partindo-se do pressuposto de que é possível expressar computacionalmente a complexidade a partir de comportamentos individuais mútuos e que a gama de possibilidades desses comportamentos pode ser potencialmente ampliada pelas noções de modelagem paramétrica, lança-se a seguinte hipótese:

A construção de um sistema *bottom-up*, com a variação paramétrica de componentes, permite chegar à mesma liberdade formal dos processos *top-down*, mas com as vantagens da auto-organização.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é propor um método para a geração automatizada de estruturas espaciais complexas baseado em noções científicas oriundas das teorias da complexidade e emergência, e suas aplicações exploratórias na computação natural. A partir da identificação de duas abordagens predominantes no Design Computacional, a *top-down*, mais relacionada aos processos de otimização e a *bottom-up*, mais relacionados aos processos de auto-organização, pretende-se a exploração desta última utilizando a modelagem baseada em agentes autônomos.

De maneira mais específica, estabelecem-se os seguintes objetivos:

- Produzir métodos para a geração automatizada de estruturas espaciais de elevada complexidade com base em processos artificiais de auto-organização;
- Esmiuçar possibilidades de aplicação da computação bioinspirada nos processos de projeto em arquitetura;

- Difundir métodos generativos de projeto e sua implementação dentro dos aplicativos de modelagem paramétrica;
- Propor métodos de exploração formal utilizando protótipos virtuais e físicos, os quais possam ser incorporados aos estágios iniciais do processo de projeto;
- Aproximar as técnicas de prototipagem e fabricação digitais do *design* de estruturas, identificando possibilidades e limitações para essa prática.

1.3 MOTIVAÇÃO

No panorama atual do Design Computacional, as abordagens *top-down* e *bottom-up* têm sido direcionadas a aplicações diversas. Contudo, as duas abordagens acabam tendo preponderâncias diferentes nos sistemas generativos baseados em regras ou em performance. (FASOULAKI, 2008). Nos sistemas generativos baseados em regras, abordagens *bottom-up* podem ser expressas em algoritmos inspirados em processos biológicos, como os autômatos celulares e os *L-systems*, ou fundamentados em regras matemáticas, como os fractais e as gramáticas de forma. Já nos sistemas generativos baseados em performance, as abordagens *top-down* se verificam em ferramentas de simulação e otimização expressadas, por exemplo, por meio dos algoritmos evolucionários, também inspirados em processos biológicos.

Por ser uma disciplina de projeto que permeia tanto a arquitetura, quanto a engenharia estrutural e, em última instância, a computação, o *design* estrutural apresenta algumas tendências particulares. Talvez em virtude das noções lineares de vários processos de projeto, a solução estrutural é vista em muitos casos como uma atividade posterior à concepção da forma arquitetônica. Provavelmente esse aspecto contribuiu com o fato de que nas pesquisas sobre o *design* estrutural, as estratégias baseadas em desempenho sejam muito mais frequentes do que as estratégias baseadas em regras. Kilian e Ochsendorf (2005) identificaram essa preponderância no contexto atual do Design Computacional:

"[...] recentemente, as técnicas de otimização que utilizam o método dos elementos finitos têm demonstrado o grande potencial dessa técnica, a partir do refinamento da forma estrutural, minimizando esforços de flexão. Esse método permite ao projetista iniciar o processo de projeto com uma forma ineficiente, tal como uma casca de concreto não-estrutural, para então buscar uma forma mais eficiente minimizando esforços locais de flexão. Em síntese, existem várias ferramentas de análise para o refinamento da forma, mas são poucas as ferramentas para explorar e criar novas formas estruturais" (KILIAN e OCHSENDORF, 2005, p. 77. Tradução nossa).

A ideia do projeto integrado tem como objetivo preencher a lacuna entre essas duas estratégias. A convergência entre os processos de geração e performance é balizada pela busca da integração entre as noções de estética e performance. Desse modo, tendo em vista o desafio da integração em extrair a sinergia desses processos, o investimento em sistemas generativos permite ampliar o espectro de possibilidades do projeto integrado.

A exploração para a geração de formas estruturais encontra lugar dentro da ciência exploratória, principalmente porque possibilita obter elevados níveis de complexidade, a partir de um número reduzido de regras. Além do controle processo de geração da forma permitido pelos sistemas baseados em regras, existe a possibilidade do seu direcionamento auto-organização de elementos, o que teria impacto direto na automatização dos processos de projeto de estruturas. Por conseguinte, a associação da auto-organização com potencialidade dos sistemas generativos em produzir um elevado número de possibilidades, abre também a possibilidade de análise múltiplas soluções por meio de métodos de otimização e simulação.

A exploração formal conjunta dos sistemas generativos com as noções de prototipagem e fabricação digitais permite investigar a possibilidade de personalização de uma grande quantidade de elementos e produzi-los de maneira viável dentro das plataformas CAD-CAM. No contexto das estruturas complexas, essa funcionalidade é bastante desejável, uma vez que a produção de formas menos racionalizadas geralmente conduz a diferentes elementos. A adoção do sistema generativo nesse caso, acaba por legitimar a potencialidade de uso da tecnologia CNC, atualmente disponível no parque industrial brasileiro, contudo subutilizada em comparação com outros setores do mercado (SILVA, et al., 2009).

Capítulo Dois

Complexidade, emergência, bioinspiração e arquitetura

“

Embora as propriedades dos ácidos desoxirribonucleicos sugiram uma estrutura molecular de elevada complexidade, o estudo de difração de Raios-X proposto aqui demonstra sua configuração molecular muito simples.”

—— FRANCIS CRICKS E JAMES WATSON, 1953

Trecho do texto artigo científico da revista Nature,
que divulgou a descoberta do DNA.

Complexidade é um termo do latim que encerra significados diversos nas línguas de origens latina e saxônica. Em alguns contextos, a complexidade expressa a qualidade do que é complicado, de difícil apreensão. Em outros, pode estar relacionado à confusão, ao embaraço. Também é clara a proximidade entre esses significados, de modo que o que é confuso pode ser confuso por ser complicado, por não apresentar um ordenamento, ou ainda, por apresentar um ordenamento não identificável. Algumas vezes, a complexidade também pode ter seu sentido carregado de certa soberba, por ser algo de compreensão difícil. Neste capítulo se buscará delinear a noção de complexidade sob a perspectiva evolucionária, que tem suas raízes na segunda metade do século XIX, passando pela Teoria Geral dos Sistemas e suas implicações na Computação Científica, na Inteligência Artificial e, conseqüentemente, no Design Computacional.

Enquanto a complexidade pode ser a característica de muitos sistemas e processos naturais, no Design Computacional o estudo da complexidade é associado ao artificial, ao sintético, isto é, aos sistemas produzidos pelo homem. Apesar de criações humanas, esses sistemas consistem de partes e relações planejadas, por vezes complexas, que frequentemente ultrapassam a capacidade de gestão do próprio idealizador. Paradoxalmente, o ser humano parece hoje exceder o seu intelecto por meio da computação, na qual algoritmos podem conduzir a extensão do pensamento de um projetista a níveis ainda não claramente mensurados. A inabilidade da mente humana em compreender, explicar ou prever uma complexidade artificial é causada, principalmente, por uma restrição quantitativa, na qual muita informação e tempo são necessários para apreender todas as variáveis do problema. Por conta dessa natureza quantitativa, o estudo da complexidade envolve, necessariamente, métodos computacionais de análise, simulação e síntese, a fim de processar a elevada quantidade de informação (TERZIDIS, 2006).

2.1 COMPLEXIDADE E EMERGÊNCIA

"Eu estudo formigas, faço isso porque gosto de estudar a respeito de como as organizações funcionam. Em particular, como as partes mais simples dessas organizações interagem para criar um comportamento do todo." Ao utilizar essa frase para iniciar uma palestra em 2003, Deborah Gordon não estava se referindo somente ao comportamento que levou as formigas a se tornarem um dos seres de mais numerosa população no planeta. Além disso, noções profundas sobre como as coisas se organizam ou como enxergamos uma organização para as coisas estão presentes no cerne desse comentário. Os modelos de organização que costumeiramente elegemos são, em muitos casos, reflexos do nosso modo de vida, de nossas experiências. Há algum tempo, esses modelos não têm se mostrado suficientes para explicar estruturas complexas, como a organização de um formigueiro no deserto do Arizona (GORDON, 2003).

As ideias sobre a organização de sistemas complexos não são recentes e, em muitos aspectos, o texto de Weaver de 1948 (republicado em 2004) pode ser considerado um dos mais seminais. Esse autor produziu uma retrospectiva sobre a pesquisa científica na primeira metade do século XX, no qual controvertia o termo "complexidade desorganizada", recorrente entre os pesquisadores das teorias da probabilidade e da mecânica estatística. Weaver propôs duas classes de complexidade: a organizada e a desorganizada, definidas não em termos da quantidade de variáveis, mas em função da análise de elementos isolados ou agrupados.

Enquanto algumas complexidades são delineadas pela instabilidade individual, outras apresentam alguma estabilidade ou padronização, podendo ser chamadas, então, de organizadas. Weaver ilustrou essa distinção com o clássico exemplo da mesa de bilhar: quando tentamos descrever o movimento de uma bola, não enfrentaremos grandes problemas; já alguma quantidade de bolas torna a tarefa demasiado complexa. Entretanto, independentemente do número de bolas, se estas se movimentassem em raias, paralelas umas às outras, várias análises poderiam ser feitas: qual está mais rápida? Mais lenta? Qual é a média das velocidades? Essas questões não são formuladas a partir das noções de complexidade e desorganização (WEAVER, 1948).

A classe de problemas científicos na qual se enquadra a complexidade organizada atua em uma zona intermediária, com um número de variáveis elevado se comparado a dois, mas reduzido se comparado à quantidade de átomos em uma colher de sal. No entanto, a grande questão nessa dimensão dos problemas não é, de fato, o número de variáveis, embora a maioria dos problemas de complexidade organizada envolva um número considerável delas. A característica fundamental reside no fato de que nesses problemas, em oposição às situações de complexidade desorganizada, ferramentas como a Estatística e a Computação podem evidenciar características dessa organização. Questões do tipo: "por que uma determinada classe de microrganismos sintetiza certos compostos orgânicos em minutos e outras classes do mesmo microrganismo não podem fabricá-los?", ou "como pode-se identificar padrões de comportamento em um grupo de pessoas com o rótulo minorias raciais?" São exemplos de questões com muitas variáveis, mas passíveis de serem caracterizadas em termos de padrões comportamentais (WEAVER, 1948).

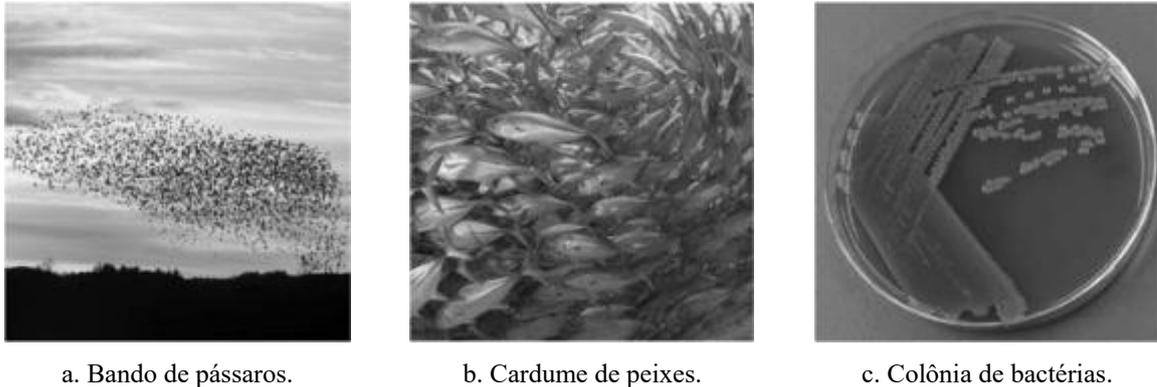
Justamente os padrões comportamentais é a hipótese utilizada por Deborah Gordon para explicar a complexa organização dos formigueiros, pois, identificando padrões, as formigas determinam uma série de características de sua sociedade. Cada uma delas desempenha um papel definido: coletoras, patrulheiras, mantenedoras e lixeiras, embora já se saiba que existem mudanças de funções dependendo da necessidade social. Mas as questões que têm merecido maiores aproximações científicas são: como as formigas gerenciam essas tarefas? Como a execução de tarefas simples dão origem a uma organização tão complexa? Nos primeiros estudos entomológicos, acreditava-se que a formiga-rainha emitia ordens a partir de feromônios reconhecidos por suas operárias para o desempenho das funções. Atualmente, não se percebem registros de comando, já que a função da rainha é, basicamente, manter relações sexuais, colocar ovos e alimentar as larvas com suas reservas de gordura. A comunicação e alocação de tarefas

acontece de um modo mais sofisticado e até estatístico. Quando uma coletora sai do ninho em busca de alimento e encontra outras formigas de funções diversas, estima a demanda do formigueiro com base nesses encontros. O somatório dessas "análises estatísticas" resulta na estimativa do tamanho da colônia, com uma margem de erro praticamente nula (GORDON, 1999).

Ao se encarar a questão da organização do formigueiro como um problema de complexidade desorganizada e tentar descrever o comportamento de uma única formiga de modo isolado, é possível que esse comportamento seja classificado como ignorante. Mas ao analisar esse comportamento de maneira conjunta ao comportamento de outras formigas, a ignorância pode ser entendida como em linguagem de programação, isto é, não como um defeito e sim como uma característica; uma característica que participa da formação de um comportamento coletivo. Isso significa dizer que os problemas científicos que tangem a dimensão da complexidade organizada têm uma componente dialética de existência ou, pelo menos, só fazem sentido dentro de um contexto mais amplo. Olhando novamente para as bolas de bilhar de Weaver: existe a mais rápida, somente porque existem todas as outras mais lentas.

Não só as formigas, mas outras organizações naturais possuem características que emergem da reunião de comportamentos individuais (*Figura 8*). Mas o sentido dessa reunião vai muito além da soma dos comportamentos das partes que culminam no todo. Em todos, existe a formação de padrões a partir da interação entre uma quantidade de entidades simples, denominadas agentes. As reflexões sobre o comportamento emergente desses agentes tiveram início na segunda metade do século XIX e o termo "emergência" acabou sendo apropriado por uma variedade de teóricos, desde que o psicólogo inglês George Lewes lhe deu um sentido filosófico (BLITZ, 2010). Em uma das primeiras utilizações do termo, Lewes faz uma reflexão sobre os diferentes modos de geração dos sistemas:

"Uma molécula de água tem as mesmas propriedades de um litro de água. Mas isso só é de fato verdade se as propriedades analisadas não forem diretamente dependentes da quantidade. Experimentos com substâncias finamente divididas mostram que, em muitos casos, as substâncias começam a perder suas propriedades molares ao se tornarem moleculares, uma vez que o comportamento das moléculas individuais é alterado em uma massa mutuamente equilibrada [...] portanto, a relação entre componentes e elementos tem grande importância. Todas as relações quantitativas estão no nível dos componentes; todas as relações qualitativas estão no nível dos elementos. As combinações da primeira são *resultantes*, que podem ser analiticamente demonstradas; as combinações da segunda são *emergentes*, que não podem ser vistas nos elementos, nem deduzidas a partir deles." (LEWES, 1874, p. 98, grifo nosso).



a. Bando de pássaros.

b. Cardume de peixes.

c. Colônia de bactérias.

Figura 8: Exemplos de comportamentos naturais emergentes.

Fonte: <http://www.bbc.co.uk/nature/adaptations/swarm>

Esses sistemas de organização apresentam um dos mais impressionantes comportamentos descentralizados da natureza: inteligência, personalidade e aprendizado emergem de baixo para cima, em um complexo sistema *bottom-up*. Curiosamente, o que parece impulsionar a harmonia desses processos é a ânsia por padrões, equivalências, similitudes. Neles, a inteligência superior emerge a partir de percepções registradas, em uma ferramenta que varre um espectro de frequência de suas ocorrências. Esse processo tem sido entendido pela ciência como um mecanismo de reconhecimento de padrões⁶ e trata-se do entendimento da regularidade de dados a partir da clássica conexão de duas vias chamada interação. Diferentemente dos vínculos unidirecionais, a inteligência de uma colônia densamente interconectada deriva do *feedback* entre agentes que se encontram e mudam seu comportamento de acordo com regras preestabelecidas. Todos os sistemas emergentes são construídos com esse tipo de feedback: conexões de duas vias que fomentam a aprendizagem em um nível mais alto (JOHNSON, 2003).

Um dos ensaios sobre a evolução da noção de emergência foi proposto por Corning (2002), que apresentou um histórico sobre as facetas dadas ao conceito desde sua inserção no século XIX. Nas primeiras aproximações, fica evidente a perspectiva evolucionista das definições, em geral, fornecidas por filósofos pós-darwinianos. Nesse período, além do reconhecimento de sistemas naturais fundamentados na emergência, houve uma clara preocupação explicativa sobre as causas e origens das interações entre os agentes. De maneira precursora, a emergência foi caracterizada como "uma energia inerente aos processos evolutivos, que os conduz para os níveis de organização" (SPENCER, 1978). Na visão de Corning, essa energia advém de uma mudança que começa com alguma interrupção nos processos nos quais os agentes se

⁶ Do inglês, *pattern recognition*. Tradução nossa.

comportam de maneira similar. Caso não houvesse essa interrupção, não haveriam necessidades de mudança ou de organização. Ao haver uma perturbação, o sistema se diferencia e criam-se novas alianças entre os agentes com base nessas diferenças. Quando a necessidade dos agentes e de todo o sistema são supridas, o sistema se funde em uma complexidade de ordem superior.

Das abstrações filosóficas do período pós-Darwin até a década de 1920, as discussões da Metafísica Moderna ratificaram os vínculos da emergência com algum tipo de mudança. No entanto, os pensadores desse período acrescentaram níveis de existência dos sistemas. Um deles, o emergente, é onde se inicia a percepção dos processos organizados. Na origem das percepções, existe a ocorrência de uma irregularidade, que impossibilita a enunciação de qualquer lei, e talvez aí resida a dimensão de atuação dos problemas de complexidade desorganizada. Posteriormente, existe a substituição das características comportamentais iniciais por relações funcionais. Só então, com a funcionalidade estabelecida, passa a existir o comportamento emergente, que é uma sequência de mudanças cumulativas adequadas a uma determinada situação. Para Pepper (1926), o delineamento desse comportamento passa por três considerações: 1) existem níveis de existência definidos em termos dos graus de interação; 2) existem traços que distinguem esses níveis uns dos outros, além dos graus de interação; 3) não é possível deduzir os traços de um nível mais elevado a partir de um nível mais baixo e, talvez também seja impossível deduzir os traços de um nível mais baixo a partir de um nível mais elevado. Embora os filósofos evolucionistas e metafísicos modernos tenham desenvolvido grande parte dos conceitos sobre emergência, uma variedade de disciplinas se valeram da mesma noção a partir da década de 1960, permitindo um salto inesperado à conceituação. Nesse período, um dos maiores incrementos ao pensamento foi a noção de mudança de paradigma⁷, proposta por Kuhn (1962), que, por vários motivos, vai ao encontro do que se propõe atualmente em termos de modelos emergentes. Em síntese, a mudança de paradigma propõe que a evolução da teoria científica não provém da acumulação de feitos, mas sim de um grupo de circunstâncias e possibilidades intelectuais sujeitas a mudanças. Essa noção influenciou fortemente uma das experiências narradas por Waldrop (1992), que foi a criação na década de 1980 do Instituto de Santa Fe, nos Estados Unidos, uma das instituições pioneiras na investigação de sistemas complexos. A partir da reunião de biólogos, cosmólogos, físicos, economistas e outros, foram exploradas noções incomuns sobre complexidade, teoria dos sistemas e processos adaptativos. Apesar das diferenças entre as noções apresentadas, a diversidade de experiências pôde ser

⁷ Do inglês, *paradigm shift*.

organizada dentro da ideia da mudança de paradigma e essa reunião transdisciplinar ficou conhecida como complexidade emergente.

Não existe um consenso entre os pesquisadores sobre a utilização da noção de emergência como um modelo explicativo para a complexidade dos sistemas. Mas, sem dúvida, essa noção representou um importante evento para o pensamento científico moderno. O principal adendo dos últimos anos foi a possibilidade aberta pela Matemática Não-Linear para a modelagem de interações complexas e dinâmicas. Mais adiante, a Computação Científica permitiu a construção desses modelos e o desenvolvimento de resoluções numéricas para análise e solução de problemas científicos e de engenharia. No contexto das ciências naturais, a Computação, a Matemática e a Estatística são denominadas terceiras ciências, entretanto proveem ferramentas que auxiliam na explicação dos fenômenos científicos. Nas Engenharias e nas Ciências Sociais Aplicadas, a Computação tem um papel diferente e, por muitas vezes, se inspira em teorias das ciências naturais para a solução dos problemas do cotidiano (HOLMAN, 2010).

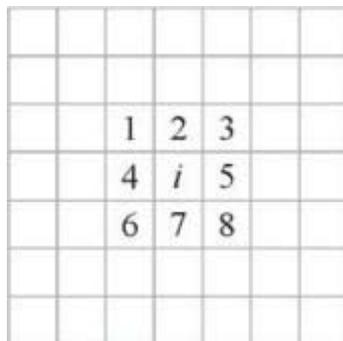
2.2 MODELAGEM ARTIFICIAL DO CONCEITO DE EMERGÊNCIA

Antes de propor a simulação artificial do fenômeno natural da emergência é importante estabelecer a distinção entre a utilização do conceito nas ciências naturais e sua apropriação nos problemas de engenharia. Nas pesquisas de caráter explicativo, isto é, que se propõem a investigar o porquê dos fenômenos, os modelos baseados na emergência têm permitido aprofundar o conhecimento de uma dada realidade. Em um exemplo, na tese intitulada *Textura del sistema nervoso del hombre y de los vertebrados*, S. Ramón y Cajal desenvolveram definições importantes dentro do campo da neurociência no início do século XX. Dentre as principais contribuições, os autores explicitaram a hipótese sobre a otimização da estrutura dos sistemas nervosos durante a evolução com base na noção de emergência. Na época, a elucidação da estrutura complexa dos sistemas nervosos foi difícil de ser quantificada com dados reais. Ainda hoje, a produção de um mapa topológico de cada um dos neurônios do cérebro de um vertebrado é tecnicamente impossível. Entretanto, existe um organismo invertebrado no qual a complexa organização neurológica já está completamente mapeada, o nematoide *C. Elegans*. A partir de um modelo computacional do sistema nervoso desse invertebrado tem sido possível simular o sistema nervoso de um vertebrado, ou seja, um modelo explicativo para a hipótese que S. Ramon y Cajal, desenvolvida um século atrás (ARENAS, FERNANDÉZ e GOMÉZ, 2008).

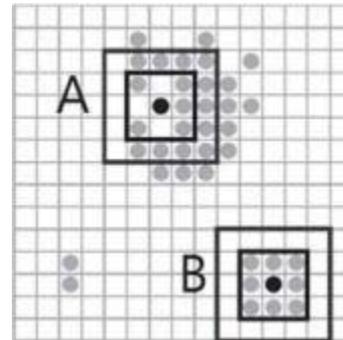
Já nas pesquisas exploratórias, o objetivo é proporcionar maior familiaridade com o problema, a fim de torná-lo mais explícito ou de construir hipóteses. Nesse contexto, pode-se resolver problemas a partir de soluções inspiradas na natureza. Os sistemas computacionais bioinspirados são um exemplo de investigação em que se constroem metáforas de modelos teóricos, com vistas à solução de problemas complexos. Os resultados dessas experiências são algoritmos ou sistemas que contém semelhanças (muitas vezes superficiais) com fenômenos biológicos. Os recentes avanços da computação biologicamente inspirada podem ser organizados em quatro seções: 1) algoritmos evolutivos; 2) inteligência coletiva; 3) vida artificial e criaturas artificiais; 4) processamento de informações e sistemas cognitivos. As noções de complexidade e emergência são bastante relacionadas com a inteligência coletiva de cardumes e enxames, por exemplo. Além disso, uma parcela dos processos orgânicos ocorre a partir de ações de elementos simples e, nesses processos, a cooperação, a competição e a coordenação costumam balizar as ações dos agentes individuais (DE CASTRO e VON ZUBEN, 2005).

No âmbito da Computação Científica, o estudo do comportamento dos insetos parece ser uma abordagem positiva para o entendimento de muitos fenômenos coletivos. Alguns insetos podem ser mais adequados como fonte de inspiração, porque podem ser estudados e observados sem grandes custos (CAMAZINE, NIGEL et al., 2001; HÖLLDOBLER; WILSON, 1994). Uma das estratégias mais utilizadas nos sistemas bioinspirados é o estudo de um ou mais mecanismos específicos de um tipo de inseto, como formigas ou abelhas. É o caso do algoritmo Standard Ant-Clustering (SACA), que tem acumulado implementações baseadas nos sistemas de percepção das formigas. Primeiramente, a construção desse algoritmo teve motivação no comportamento coletivo denominado estigmergia, que é um mecanismo indireto de coordenação de ações. Em insetos como formigas e cupins, o feromônio é um tipo de estigmergia que possibilita a comunicação entre os indivíduos a partir de substâncias químicas liberadas no ambiente. O SACA expressa em uma malha bidimensional o comportamento randômico das formigas em pegar ou deixar os objetos com base nos ferômonios identificados em sua vizinhança (*Figura 9a*). Posteriormente, limitações na percepção da densidade dos ferômonios conduziu ao aprimoramento do SACA com uma programação inspirada no campo de visão das formigas (*Figura 9b*). Embora a implementação desses sistemas de percepção pareça uma redução explicativa da realidade, do ponto de vista exploratório, sua aplicação em problemas reais parece ser inequívoca. Atualmente, o SACA tem sido utilizado para simular

um mecanismo de tomada de decisão em robôs (LUMER e FAIETA, 1994; SHERAFAT e DE CASTRO; HRUSCHKA, 2005).



a. Malha bidimensional com a célula i e suas oito células vizinhas



b. Diferentes condições de percepção da estigmergia artificial, aprimorada posteriormente pelo campo de visão artificial.

Figura 9: Implementações do algoritmo SACA.

Fonte: Adaptado de Sherafat, De Castro e Hruschka, (2005).

A expressão Computação Natural tem sido empregada na literatura científica para descrever todos os sistemas computacionais desenvolvidos com inspiração ou utilização de um mecanismo natural ou biológico de processamento de informação. Embora a computação tenha feito grande uso dessas estratégias, existem vários outros exemplos de artefatos desenvolvidos com inspiração na natureza. Dentre os mais famosos estão o velcro, inspirado nas sementes de carrapicho (*arctium*), o colete à prova de balas, inspirado nas teias de aranha e os sonares, inspirados no mecanismo de localização espacial comportamento dos morcegos.

Sob essa perspectiva exploratória, as noções de emergência propostas por Holland (1999) buscaram orientar a construção de modelos computacionais inspirados em estratégias oriundas das teorias dos grafos e dos jogos. Um exemplo cotidiano desse tipo de correspondência pode ser encontrado nos mapas rodoviários, nos quais comumente se representam as cidades por meio de pontos. As mais populosas são representadas por pontos maiores que as de menor população. Mesmo assim, a partir do modelo, não se podem extrair informações precisas sobre o tamanho das cidades, a não ser as relações comparativas do tipo "maior que" ou "menor que". Em um nível de correspondência mais concreto, as estradas são representadas por linhas que permitem avaliar relações além das comparativas. As extensões reais das estradas são perfeitamente mensuráveis, dentro dos níveis de precisão necessários ao objetivo dos mapas rodoviários, utilizando-se os conceitos de proporção e escala.

Muito além da aplicação nos mapas, as linhas e os nós estão entre as correspondências mais comuns entre os modelos e a realidade. Como modelo, essas configurações podem ter relações concretas com os objetos físicos, tais como a representação de circuitos elétricos, de redes viárias, ou de moléculas orgânicas. Podem também apresentar relações menos tangíveis, como a representação de ecossistemas, de redes sociais, ou fluxos de um programa de computador. Formalmente, essas configurações são modeladas por estruturas combinatórias denominadas grafos e consistem em dois conjuntos básicos, de vértices e de arestas, além de uma relação incidente entre eles. Ao modelar as ruas de uma cidade, por exemplo, será necessário atribuir direções às arestas. Já entre dois átomos de uma molécula orgânica é comum existir mais de um vínculo entre os núcleos. Nos programas de computador as estruturas em laço são ações enclausuradas de maneira recursiva, nos quais os traços de seu grafo representativo têm início e fim coincidentes. Esses são alguns exemplos de modelos que requerem grafos com direções em suas arestas, com múltiplas conexões entre vértices e com conexões de um vértice para com ele mesmo (GROSS e YELLEN, 2006).

Dentre as inúmeros modelos baseados na teoria dos grafos, as ideias seminais de Huffman (1952) se tornaram o caminho mais natural para a codificação da informação em um computador. Os Códigos de Huffman são uma proposta de modelagem da informação, a partir da existência de somente dois estados possíveis, os 0's e os 1's. Essa representação em códigos binários consiste em converter símbolos de outros significados para um conjunto de *bitstrings*⁸. Em sua tese de doutorado, o autor propôs a codificação de sinais de pontuação, símbolos matemáticos, letras e espaços em branco, a partir de sua frequência de ocorrência em uma expressão. No procedimento proposto, os símbolos foram organizados graficamente na forma de uma pirâmide, da base para o ápice, dos de maior ocorrência para os de menor ocorrência. Em seguida, desenharam-se traços bifurcados, a fim de reunir todos os símbolos segundo uma árvore binária. Aos traços da árvore foram atribuídos os valores '0' ou '1' e os códigos gerados representam o percurso dos galhos (*Figura 10*). Essa codificação permite localizar rapidamente a posição de um elemento dentro da árvore (HUFFMAN, 1952).

Nos modelos artificiais de emergência, Holland (1995) propõe uma relação entre o registro de ações e a previsão de acontecimentos. Essa é uma das características dos jogos de tabuleiro⁹

⁸ Linhas de código.

⁹ Go, Weiqi ou Baduk, é um jogo estratégico em que duas pessoas posicionam pedras de cores opostas em um tabuleiro. As peças podem ser capturadas, caso sejam totalmente cercadas pelas peças do adversário, assim o jogo deve ser feito de modo a obter o máximo de território para si, e ao mesmo tempo posicionar-se de modo a se defender.

(Figura 11a-c), que subentendem uma sequência de ações entre os oponentes com base jogadas anteriores visando as jogadas futuras, todas submetidas a um universo de regras pré-estabelecidas. Essas regras podem ser descritas por expressões numéricas, nas quais pode-se determinar as probabilidades com base nas ações executadas. Esses são, portanto, estados momentâneos dos jogos onde já existe uma disposição de elementos e quanto mais os elementos se movem, mais possibilidades vão sendo abertas. No jogo de xadrez, por exemplo, em uma malha de 64 espaços, são dispostas 16 peças de cada lado, de 6 tipos diferentes: peão, torre, cavalo, bispo, rainha e rei. Por meio de ações simples, estima-se que possam haver até 10^{43} possibilidades de movimento antes de um xeque-mate (para uma ordem comparativa, o total de átomos de hidrogênio do universo é estimado em 10^{90}). Mesmo assim, se observarmos o movimento de um bispo, que se dá sempre na diagonal, em qualquer momento do jogo sabemos que ele ocupa um espaço da mesma cor de seu espaço inicial. Essa é uma primeira previsão com base em uma regra pré-estabelecida, mas previsões muito mais sofisticadas podem ser feitas (PETERS, 2008).

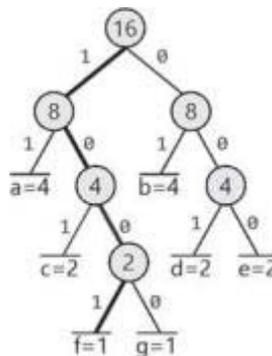


Figura 10: Árvore binária proposta por Huffman (1952). Neste exemplo, o percurso que gera o código binário para a letra *f* é o 1-0-0-1. Fonte: Huffman (1952).

Embora as regras sejam definidoras dos próximos acontecimentos de um jogo, dependendo do estágio de complexidade essa previsão acaba sendo exponencialmente dificultada. Nos jogos raramente os estágios anteriores são retornados. Isso dificulta enormemente a previsibilidade dos próximos acontecimentos e essa dificuldade provém do conhecimento e da adaptação dos jogadores às jogadas dos adversários. Portanto, as ações vão se reorganizando ao longo do tempo e também se ajustando as características do oponente. Contudo, se é possível falar em "características" do oponente, logo, em um nível mais abstrato, existem estratégias, como um conjunto de regras com um objetivo específico. Essas estratégias não podem ser identificadas pela análise do movimento de uma única peça isolada, do mesmo modo que as estratégias não dizem muito sobre os movimentos das peças isoladas. O que fica claro é que se pode extrair um

padrão recorrente das ações de uma estratégia e até classificá-las como agressivas ou comedidas. Quando esse padrão recorrente é associado com eventos de interesse, pode-se dizer que ele contém propriedades artificiais emergentes (HOLLAND, 2006).



Figura 11: Jogos de tabuleiro. Fonte: ilustração nossa.

Utilizando noções baseadas no reconhecimento de padrões, diversos algoritmos para a solução de jogadas de xadrez foram desenvolvidos por pesquisadores da Carnegie Mellon University nos anos 1950. Nessas implementações, as características do jogo foram associadas com objetivos programados separadamente, em que cada deles exigia um gerador de movimentos, um avaliador de estatísticas e um procedimento de análise. A fim de selecionar os objetivos relevantes a uma determinada situação do jogo foi desenvolvida uma rotina de análise preliminar, ordenando os objetivos pela suspeita de sua importância àquela situação. O conjunto de objetivos compunha metas correspondentes, incluindo a seleção de variações, a avaliação e a escolha final.

Grafos, códigos e regras são alguns dos elementos disponíveis nos sistemas artificiais que visam reproduzir qualquer comportamento natural, individual ou coletivo, e é o que permite conduzi-los a um evento de interesse manipulando a comunicação entre os indivíduos (agentes). Essa noção foi abordada de modo seminal nos textos de Claude Shannon (1938 e 1948) e na ciência desenvolvida nos laboratórios Bell (AT&T Bell Labs) fundados por Alexander Graham Bell, em 1925. No fim da década de 1940, em sua Teoria Matemática da Comunicação, Shannon definiu a capacidade dos canais de comunicação como sendo o elemento essencial aos processos de transmissão de informação. Embora dentro do contexto da indústria das telecomunicações, os estudos de Shannon tiveram inúmeras ramificações mais adiante, sendo extensivamente explorados por pesquisadores das áreas de Linguística e Ciências Sociais. Anos

mais tarde, Shannon viria a ser o orientador de doutorado de Ivan Sutherland, no MIT, na tese deu origem ao Computer-Aided Design.

Por consequência do avanço científico e tecnológico, as definições de "sistema" a partir da década de 1950 propuseram a fusão entre assuntos de abordagem aparentemente diversa na sociedade moderna. A partir dos trabalhos de Ludwig von Bertalanffy, alguns princípios unificadores que atravessam os universos particulares de diversas ciências deram origem a Teoria Geral dos Sistemas (TGS). Nessa teoria as organizações são, por definição, sistemas abertos e não podem ser adequadamente compreendidas de maneira isolada, mas sim pelo inter-relacionamento entre diversas variáveis internas e externas que afetam o seu comportamento. Assim como os organismos vivos, as organizações apresentam funções principais que, embora relacionadas, são passíveis de serem estudadas individualmente. Algumas características dos sistemas são (VON BERTALANFFY, 1968):

- Probabilidades: os sistemas são complexos e normalmente sintetizam um elevado número de variáveis, desse modo, seu comportamento nunca é totalmente previsível;
- Subsistemas: as organizações podem ser entendidas como partes de um sistema maior, como subsistemas dentro de sistemas;
- Interdependência: as interações internas e externas do sistema refletem diferentes escalas de controle e da autonomia;
- Homeostasia ou adaptabilidade: a homeostasia (auto regulação) garante a rotina e a permanência do sistema, enquanto a adaptabilidade leva a ruptura, à mudança e à inovação; ambos os processos precisam ser considerados, a fim de garantir a viabilidade
- Fronteiras ou limites: é a linha imaginária que serve para marcar o que é exterior ou interior a um sistema;
- Morfogênese: capacidade de se modificar, de determinar o crescimento e as formas da organização, de se corrigir e de obter novos e melhores resultados;
- Resiliência: capacidade de o sistema superar o distúrbio imposto por um fenômeno externo;
- Sinergia: esforço simultâneo de vários órgãos que provoca um resultado ampliado, de modo que a soma das partes é maior do que o todo;
- Entropia: consequência da falta de relacionamento entre as partes de um sistema, o que provoca perdas de energia, decomposição e desintegração do sistema.

Pode-se dizer que esses são denominadores comuns aos sistemas complexos emergentes, tanto naturais como artificiais, e é a transferência de informação o mecanismo que permite a manifestação dessas características. Seja por meio de um mecanismo químico de comunicação, como o feromônio, ou em uma criptografia de dados, a informação é recebida, processada e transmitida. Do ponto de vista de Shannon e Weaver, nos problemas de engenharia o significado do que está sendo transmitido não é tão importante quanto a quantidade de informação que está sendo transmitida:

"O problema fundamental das comunicações é reproduzir em um determinado ponto, tão exato quanto possível, uma mensagem originada em um outro ponto. Frequentemente, as mensagens contêm significados, isto é, elas se referem ou são correlacionadas a algum sistema de entidades físicas ou conceituais. Estes aspectos semânticos da comunicação são irrelevantes ao problema de engenharia. A faceta significativa é aquela em que a mensagem real tenha sido selecionada entre um grupo de possíveis mensagens. O sistema deverá ser projetado de modo a operar com qualquer das possíveis seleções a serem efetuadas e, não unicamente, com aquela que realmente foi escolhida, posto que isto é desconhecido quando concebemos ou projetamos o sistema [...]" (SHANNON e WEAVER, 1975, p. 33).

A quantidade de informação tem relação direta com a dúvida eliminada entre as mensagens possíveis. Em um sorteio de cara ou coroa, por exemplo, os resultados possíveis obviamente se limitam a 2: ou cara, ou coroa. Assim, a dúvida ou, como preferiu Shannon, a incerteza, sobre o resultado está entre duas possibilidades. Já em um lance de dados, as possibilidades são 6; em uma carta de um jogo de baralho, 52, ou seja, são incertezas de ordem maior. Porém, ao se perguntar o naipe de uma carta de baralho, a incerteza diminui para 4; ao se perguntar a cor do naipe, para 2. Desse modo, a quantidade de informação em um jogo de cara ou coroa é a mesma da cor do naipe no jogo de baralho por resolver incertezas de mesma dimensão, ou seja, uma em duas possibilidades. Esse é o mesmo raciocínio utilizado na composição de uma informação digital. Uma sequência de dígitos binários traduz da mesma forma a natureza de qualquer arquivo (texto, som, imagem, etc.). Na transmissão da informação, o aspecto semântico dos 0's e dos 1's pouco importa: bits são bits, qualquer coisa que eles signifiquem (NEGROPONTE, 1995).

A operacionalidade dessa noção binária na transmissão da informação proposta por Alan Turing, também nos laboratórios Bell, impactou fortemente os processos de informação em sistemas artificiais, tornando-o um dos pais da computação. Turing desenvolveu matematicamente a máquina conhecida como Universal Turing Machine (UTM), capaz de

computar informações a partir de inputs arbitrários, o que fez surgir a ideia de algoritmo como um conjunto finito de instruções definidas. Apesar da máquina não ter sido implementada fisicamente¹⁰, Turing propôs que cada algoritmo pudesse ser executado e interpretado por um processo mecânico. Em um dispositivo lógico que ele denominou *automatic machine*, tornou-se possível ler, escrever e apagar símbolos binários em uma fita de comprimento ilimitado, dividida por quadrados de tamanho igual. Um cabeçote de leitura e gravação poderia se mover em qualquer das direções da fita, um quadrado por vez, enquanto uma unidade de controle interpretava uma lista de instruções simples movendo-se para a direita ou para a esquerda. As transições entre instruções determinavam o novo conteúdo da fita, tornando a UTM capaz de executar tarefas a partir de uma tabela de regras com um estado inicial, vários estados de transição e um estado final. Esse conjunto de instruções denominado "programa da máquina" poderia ser (TURING, 1937):

- Imprima 1, no quadrado que passa pelo cabeçote;
- Mova um quadrado para a direita;
- Imprima 0 no quadrado que passa pelo cabeçote;
- Mova três quadrados para a esquerda;
- Se houver algum dígito, apague-o;
- Vá para o quadrado *i*, se o quadrado que passa pelo cabeçote contém 0;
- Se o quadrado *i* contém 1, pare.

No exemplo acima, as instruções das linhas 1, 3 e 5 descrevem execuções de inclusão ou exclusão de dados. As instruções 2, 4 e 6 descrevem execuções transicionais, isto é, que movem o cabeçote. A instrução 7 contém uma instrução final baseada em uma condição.

Simultaneamente às pesquisas de Turing, Post (1936) desenvolveu um método matemático de cálculo essencialmente equivalente à UTM, conhecido popularmente como Máquina de Post. Do ponto de vista conceitual, o método de Post consistiu de um conjunto de *strings*¹¹ iniciais associadas a símbolos auxiliares que, por meio de instruções, davam origem a outro conjunto de *strings*. Esse processo permitiu representar qualquer função computável por meio de regras associativas, além da exploração recursiva desses conjuntos. Essa forma de reescrita ficou conhecida como linguagem generativa de Post, e motivou estudos na Computação e na Linguística, nesta última, contribuindo decisivamente à noção matemática da linguagem. Mais

¹⁰ Existem controvérsias sobre a construção física da UTM.

¹¹ Linhas textuais.

adiante, Post (1947) levantou a questão da existência de conjuntos recursivamente enumeráveis, a fim de caracterizar a borda entre o que seria ou não computável, o que contribuiu decisivamente para a teoria da *computabilidade*, também conhecida como teoria da recursividade.

Depois desse período, Turing investigou uma questão a priori absurda, entretanto inspiradora para todo o ramo da inteligência artificial que viria a florescer anos mais tarde: As máquinas podem pensar? Considerando essa possibilidade, Turing simulou um jogo de imitação entre três personagens: um homem, uma mulher e um interrogador de qualquer dos sexos, que tenta descobrir o sexo dos outros dois, sem qualquer contato visual, auditivo, etc., apenas formulando perguntas e recebendo respostas, falsas ou não. Com isso, demonstrou que as associações estabelecidas por uma máquina culminam em algo parecido com as associações feitas pelo interrogador, sob aquelas condições. Se por um lado a imitação proposta recebeu críticas, por outro as ideias contidas ali repercutiram em várias áreas do conhecimento. No argumento de Turing, ao se solicitar a um homem fingir ser uma calculadora, certamente ele faria uma exibição muito pobre, dotada de lentidão e imprecisão aritmética. Então, não poderiam as máquinas realizar algo descrito como um pensamento, mas de um modo diferente ao que o homem faz? Mesmo existindo qualquer objeção em relação às simulações, se uma máquina pode ser construída para jogar um jogo cuja estrutura de pensamento é satisfatória, então, de fato, não precisamos nos preocupar com qualquer objeção (TURING, 1950).

A ideia de Turing sobre simular processos naturais em mecanismos artificiais esteve presente na produção dos primeiros autômatos desde o período helenístico. O termo autômato, que tem relação com o significado de automação, é comumente associado às máquinas que se movem sem combustível e, especialmente, àquelas que realizam ações que lembram humanos e animais. Em sentido figurado, o termo ainda é utilizado para designar indivíduos sem espontaneidade, isto é, de comportamento maquinal (HOUAISS, 2009). Um dos problemas matemáticos mais famosos dos anos 1940 foi o de desenvolver uma máquina capaz de produzir cópias de si mesma (*self-replicating machine*). Essa ideia foi explorada pelo pesquisador polonês Stanislaw Ulam, no laboratório de Los Alamos, a partir de analogias com processos multiplicativos da biologia, ao mesmo tempo em que os computadores foram sendo construídos e utilizados nos Estados Unidos. Descobertas como a do DNA, em 1953, estimularam ainda mais as associações entre as estruturas biológicas e computacionais nesse período (BEYER, SELLERS e WATERMAN, 1985).

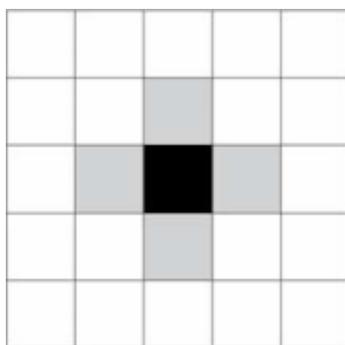
Simultaneamente, no Laboratório de Estudos Avançados da Princeton University, John von Neumann investigava a complexidade de sistemas naturais e artificiais. Mesmo após concluir uma grande discrepância de sofisticação em favor do primeiro, o autor propôs a interpretação dessa discrepância a partir da tecnologia disponível. Neumann concluiu que o organismo humano não é digital, mas uma parte dele, o sistema nervoso, é essencialmente digital. As secreções químicas, que são processos contínuos ou analógicos, são controladas por contrações e pulsos. Por outro lado, os computadores não são puramente digitais, pois, embora sua manipulação seja digital, são necessários *inputs* e *outputs* não digitais. Para Neumann, os mecanismos puramente analógicos não são adequados para a reprodução de situações que envolvem a complexidade. O modo de manipular um processo contínuo e complexo é quebrá-lo e tratá-lo em partes separadas, modelando-o por meio dessa artimanha digital (VON NEUMANN, 1958).

Partindo dessa premissa, von Neumann (1963) delineou o problema da reprodução dos sistemas artificiais pressupondo a sua divisão em partes e projetando possíveis formas de organização para essas partes. Nessa época, Neumann e Ulam iniciaram uma pesquisa conjunta, a fim de simular a auto replicação artificial utilizando processos digitais. As primeiras aproximações visaram simular os aspectos da auto-organização, sob a pretensão de dotar os sistemas artificiais com unidades autônomas elementares, tais como as células. A partir daí o problema consistiu em desenvolver autômatos auto organizáveis, em um sistema que pudesse ser expressado em termos desse comportamento. Porém, a grande dificuldade na época foi traduzir essas ideias em expressões computáveis, já que as implementações computacionais normalmente eram expressadas em termos de multiplicações matemáticas. Mesmo a multiplicação de dígitos decimais (de base 10), não eram de todo elementares. Na transposição de um sistema de base 10 para um de base 2 (notação binária), por exemplo, um dígito decimal corresponde a cerca de três dígitos binários, portanto, uma multiplicação de 10×10 (10^2) consiste aproximadamente de 30×30 ($\approx 10^3$) passos, dependendo do método matemático utilizado (FLOYD, 2007).

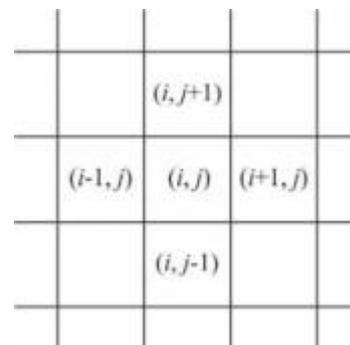
No entanto, as contribuições de Ashby (2004) para o pensamento sobre a auto-organização artificial foram contundentes em relação à possibilidade de sua *computabilidade*. O autor fundamentou a noção da auto-organização em termos de funções matemáticas, as quais poderiam ser computadas a partir de condicionalidades. O grande obstáculo à definição de um produto para esse espaço condicional era a expressão de um resultado que representasse a relação entre as organizações anteriores. Com perspicácia, Ashby representou esse resultado como uma restrição matemática, capaz de exprimir a correlação entre o que acontece em um

estado de organização A para um B. Assim, se um dado evento acontece em A e todos os eventos são possíveis em B, não existe comunicação de A para B. Logo, a comunicação entre os dois conjuntos poderia ser expressa se a organização eventual das variáveis de A produzisse uma restrição nas possibilidades de B.

Com base nessa noção condicional, von Neumann e Ulam puderam propor um modelo matemático para a auto replicação artificial estabelecendo restrições e estados de organização em um grafo quadriculado de células idênticas, alteradas continuamente e sequencialmente. Nesse artifício digital, cada célula foi envolvida por quatro células vizinhas, dispostas em seus quatro lados (*Figura 12a,b*). Denominou-se autômato do organismo um subconjunto dessas células, de configuração dinâmica, cujos conteúdos seriam obtidos por funções periódicas influenciadas pela vizinhança, e também a influenciando. Diferentemente dos binários, von Neumann estabeleceu 29 estados possíveis para as células (como se fossem 29 cores), que variavam de etapa para etapa com pelo menos uma unidade de tempo de atraso ($t - 1$). O próximo estado da célula dependia do seu estado atual e do estado atual de seus quatro vizinhos. Assim, $29^5 = 20.511.149$ regras de transição foram necessárias até se completar o processo de auto replicação (TEMPESTI, 1998).



a. Esquema gráfico.



b. Esquema numérico.

*Figura 12: Vizinhança proposta por von Neumann em seu autômato auto replicante.
Fonte: von Neumann e Burks, 1966.*

O resultado dessa experiência foi o modelo matemático-computacional da máquina auto replicante conhecida como "construtor universal", que utilizava fluxos de informação codificada e executava operações lógicas visando reproduzir-se. O modelo era composto por uma unidade computacional e uma unidade construtiva, além de uma fita contendo uma sequência de ações a serem executadas, como uma espécie de genoma artificial. O conjunto de ações permitia à máquina imprimir um novo padrão de células, construindo uma cópia completa de si mesma e da fita (VON NEUMANN e BURKS, 1966). Considerando que o construtor

universal de von Neumann possuía cerca de 100.000 células, pode se ter uma ideia do porquê sua realização não foi factível em qualquer *hardware* da época. Já com os computadores atuais a ideia do construtor universal pode ser executada com alguma facilidade.

O método utilizado por von Neumann e Ulam, com células e estados possíveis, ficou conhecido na época por *cellular spaces*, mas outros nomes, como *tessellation automata*, *homogeneous structures*, *cellular structures*, *tesselation structures* e *interactive arrays*, foram utilizados até convergirem para o termo atual *cellular automata* (em português, Autômatos Celulares)¹². Após a morte de von Neumann em 1957, Ulam (1960) investigou outros modelos celulares em malhas triangulares e hexagonais, além de desenvolver modelos em malhas tridimensionais. Outros padrões geométricos propostos por Ulam utilizando restrições simples se tornaram famosos, como a "Espiral de Ulam" ou "Espiral dos Primos" (GARDNER, 1964). Esta consistia em um grafo de números posicionados segundo uma espiral, começando com o algarismo '1' no centro. Ao se destacar os algarismos primos, revelou-se um padrão geométrico, no qual todos eles tendem a se agrupar segundo diagonais (Figura 13). Essa geometria obtida por Ulam chamou a atenção da comunidade científica na época, principalmente pelo inesperado padrão geométrico formado, em que, aparentemente de modo aleatório, algumas diagonais tendem a ter mais números primos do que outras.

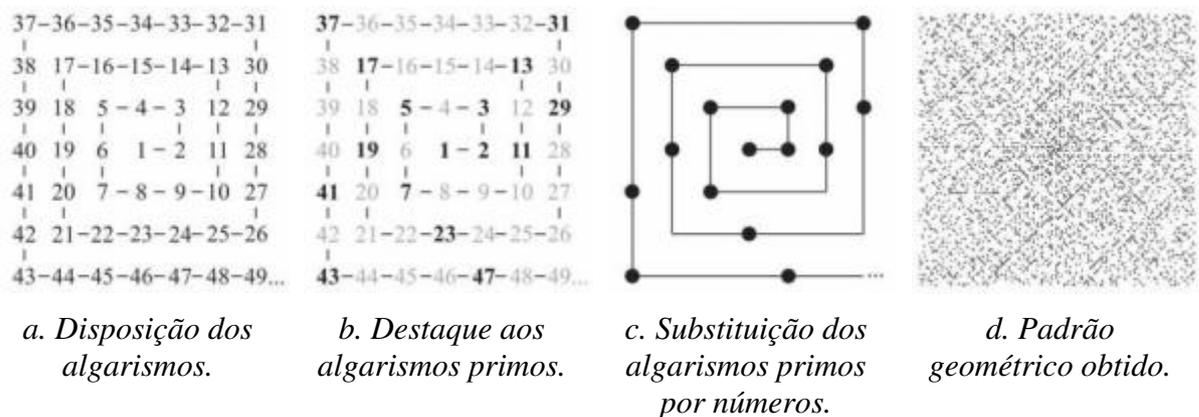


Figura 13: Espiral de Ulam. Fonte: Gardner (1964).

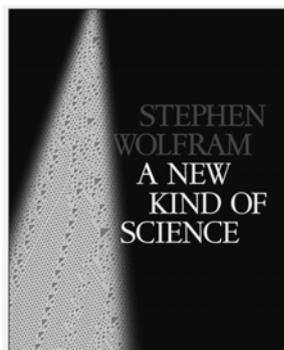
Grande parte das pesquisas de von Neumann e Ulam desse período foram registradas por Burks (1971), que definiu os autômatos celulares (CA) como sistemas dinâmicos discretos, cujo comportamento é caracterizado em termos de interações locais, tal como uma forma paralela de evolução. A partir de então, o estudo desses sistemas tem despertado grande interesse ao

¹² Neste documento utilizou-se a abreviatura CA para designar autômatos celulares, devido a ampla difusão desta sigla no Design Computacional.

longo dos anos devido a sua habilidade de gerar um rico espectro de padrões complexos a partir de um conjunto de regras relativamente simples. Embora grande parte das pesquisas sobre os CA se concentrem na Matemática e na Computação Científica, existem numerosas aplicações na Física, Química, Bioquímica e Geologia, além de outras disciplinas. Alguns exemplos de modelos dessas ciências utilizando os CA são: fluidos e turbulências químicas, crescimento de plantas, ecologia, evolução do DNA, propagação de doenças infecciosas, dinâmicas sociais, incêndios florestais, padrões de atividade elétrica de redes neurais, além da simulação de combate militar. Mesmo com a ampla variedade de CA de aplicações particulares, em praticamente todos modelos é possível identificar pelo menos cinco características comuns (ILACHINSKI, 2001):

- Malha discreta de células: o sistema consiste de células entrelaçadas em uma, duas ou três dimensões;
- Homogeneidade: todas as células são equivalentes;
- Estados discretos: cada célula tem um número finito de estados possíveis, o exemplo mais simples são dois estados (binários) 0 ou 1;
- Interações locais: cada célula interage apenas com as células que estão em sua vizinhança;
- Dinâmica discreta: cada célula tem uma definição em uma unidade de tempo e atualiza o seu estado corrente de acordo com a regra de transição, levando em conta os estados das células adjacentes.

Provavelmente o trabalho científico que reuniu o maior número de explorações computacionais envolvendo os autômatos celulares foi a publicação do britânico Stephen Wolfram (2002), intitulada *A New Kind of Science (Figura 14a)*, na qual o autor apresenta, em 1280 páginas, 20 anos de implementações com autômatos celulares iniciadas ainda na década de 1980. As aplicações demonstradas nessa publicação estendem-se à Biologia, Química, Física e outras ciências, o que elevou a condição dos CA a uma ciência exploratória, da qual Wolfram é, certamente, uma das principais referências da atualidade. As primeiras simulações computacionais de Wolfram com os CA aconteceram em 1983, no Instituto de Estudos Avançados da Princeton University, onde von Neumann desenvolveu o Construtor Universal anos antes. Logo em seguida, juntamente com Doyne Farmer e Tommaso Toffoli, Wolfram organizou a primeira conferência sobre autômatos celulares, no MIT em 1984. Atualmente, Wolfram é um dos principais desenvolvedores do aplicativo Mathematica®, cuja proposta é computar quaisquer ideias, sobre quaisquer assuntos, utilizando algoritmos simples (*Figura 14b*).



a. Vinte anos de experimentos computacionais registrados no livro *A New Kind of Science*.



Wolfram Mathematica 9

b. Aplicativo Mathematica, atualmente na versão 9.

Figura 14: Dois dos maiores produtos das pesquisas científicas com os autômatos celulares produzidas por Wolfram. Fonte: <http://www.wolfram.com>

Os autômatos celulares são uma alternativa de modelagem capaz de simular ações e interações entre entidades individuais como agentes autônomos, a fim de avaliar seus efeitos sobre um sistema global. Além dos autômatos celulares, a modelagem baseada em agentes pode combinar elementos da teoria dos jogos, dos sistemas *multiagentes*, da programação evolutiva, dentre outros. Particularmente, os autômatos celulares são modelos de base individual considerados uma forma artificial de vida devotada a investigação dos sistemas de vida por meio de experimentações abstratas de princípios dinâmicos fundamentais que subentendem o fenômeno biológico. A recriação desses comportamentos dinâmicos por meio dos computadores torna acessíveis novos tipos de experimentos, manipulações e testes, o que caracteriza esse novo tipo de ciência (SCHIFF, 2008).

2.3 FUNDAMENTOS DOS AUTOMATOS CELULARES UNIDIMENSIONAIS

Os autômatos celulares despertaram a atenção, sobretudo pela possibilidade de se obter resultados complexos a partir de regras simples. Fundamentalmente, os elementos dos CA são três: células, estados e vizinhança. Nos autômatos celulares unidimensionais, as células são dispostas em uma fita de espaços adjacentes (*slots*) e cada uma delas passa a "existir" ao ser preenchida com um estado possível (*Figura 15a*). Os estados são instâncias que diferenciam as células entre si, como cores, números, etc. A quantidade de estados possíveis tem de ser finita e maior ou igual a 2, a fim de promover uma diferenciação mínima (*Figura 15b*). Nessa situação mínima, é comum os estados serem denotados de maneira binária (0 ou 1), ou graficamente, com a utilização das cores branco e preto. Também existe uma notação antropomórfica, na qual

as células são ditas "mortas" quando não preenchidas e "vivas" quando preenchidas. Além disso, as células possuem duas vizinhas, uma à esquerda e uma à direita, com exceção das células das extremidades, com apenas uma vizinha. Esse conjunto de três células: esquerda, central e direita, é o que se entende por vizinhança (*Figura 15c*). Do ponto de vista teórico, o número de *slots* é infinito, mas na prática considera-se suficientemente amplo para ilustrar um comportamento pretendido. Em diversos casos, restrições intencionais de tamanho podem ser impostas, a fim de contemplar um objetivo (LI, 2004).

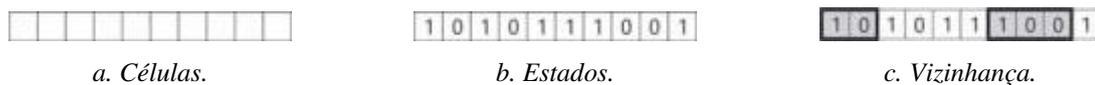


Figura 15: Elementos fundamentais dos autômatos celulares. Fonte: ilustração nossa.

Visando promover um comportamento dinâmico nas células, isto é, para que elas troquem de estado constantemente, é necessário implementar regras que propiciem sua mudança. Essas regras são executadas utilizando momentos discretos de tempo, denominados instantes t : ($t = 0, 1, 2, 3, \dots$), como a marcação de um relógio. O instante de tempo $t = 0$ se refere a uma configuração inicial, antes de qualquer mudança nos estados. A partir desse instante, as regras, ou funções de transição, determinarão como cada célula será alterada, com base no seu estado atual e nos estados atuais das células adjacentes. Assim, a vizinhança altera os próximos estados de uma célula ao mesmo tempo em que também tem seus estados alterados. A fita de células, os estados possíveis, em conjunto com as funções de transição definidas com base na vizinhança é o que configura o resultado de um autômato celular (SHIFFMAN, 2012).

Nos CA_{1D}, cada instante t produz uma geração de fita de células, a ser colada embaixo da fita anterior. O novo estado de uma célula é, portanto, o resultado da incidência das regras de transição em sua vizinhança na geração imediatamente ancestral. Assim, é possível estabelecer uma regra em que a vizinhança '101', por exemplo, corresponda ao estado '1' na próxima geração e, desse modo, o algarismo central '0' dessa vizinhança se torne '1' na geração subsequente. Esse trio numérico de dois estados binários é o que se denomina numeral 3-bit na Ciência da Computação. Com isso são possíveis 8 vizinhanças: (111); (110); (101); (100); (011); (010); (001); (000). Na situação mais fundamental de um CA_{1D} o raciocínio é análogo. A partir dessas vizinhanças, define-se uma função de transição, a fim de se obter o novo estado de uma célula na geração seguinte (). Esse padrão de 8 configurações possíveis não é ao algarismo de 8-bits, ou seja, 1 Byte (*Binary Term* ou Octeto), que é também a unidade de medida mais utilizada na Ciência da Computação (SCHIFF, 2008).



a. Gerações nos instantes de tempo n . b. Vizinhança determinando o novo estado de uma célula.

Figura 16: Comportamento dinâmico dos autômatos celulares. Fonte: ilustração nossa.

Do ponto de vista algébrico, a quantidade de vizinhos de uma célula é denotada por 'raio' (r), um número que representa a quantidade de células à direita e à esquerda de uma célula central. Portanto, cada vizinhança contém sempre $2r + 1$ células. A quantidade de estados é denotada pela letra ' k ' e, portanto, na diferenciação mínima (binária), tem-se $k = 2$. A situação mencionada, de 8 combinações de 3 possibilidades (1 *byte* ou 8 numerais 3-bit), é a mais simples: $r = 1$ e $k = 2$. A partir da relação $k^{2r + 1}$ é possível determinar a quantidade de combinações possíveis em um CA_{1D}. Logo, uma vizinhança de 3 células e 2 estados possibilita $2^3 = 8$ vizinhanças. Nas próximas gerações, o algarismo central do numeral 3-bit será alterado com base nos valores dos algarismos à esquerda e à direita (HOPCROFT, MOTWANI e ULLMAN, 2001).

Uma função que permite a troca de estados pode ser definida de inúmeras maneiras. Um exemplo é a seguinte regra condicional, para $r = 1, k = 2$ (de representação binária 0 e 1):

- divida a soma do numeral 3-bit por 2; se o resultado for inteiro, preencha a próxima geração com 0, senão, preencha com 1, considerando hipoteticamente o zero como um inteiro.

Essa regra gera oito situações como estas:

- (111) $\rightarrow 1 + 1 + 1 = 3 \rightarrow 3/2 = 1.5$, não inteiro, logo (111) = 0;
- (011) $\rightarrow 0 + 1 + 1 = 2 \rightarrow 2/2 = 1.0$ é inteiro, logo (011) = 1

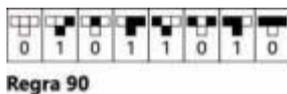
Das oito possibilidades de preenchimento tem-se quatro 0's e quatro 1's. Assim, a aplicação sucessiva dessa regra produz uma densidade de 50% de células de cada um dos estados binários. Se são possíveis 8 combinações de 3-bits e 2 possibilidades de resultados para essas combinações, logo temos, $2^8 = 256$ regras possíveis. Não por acaso, esse é também o padrão de combinação utilizado na obtenção do espectro de 256 cores RGB (*Red Green Blue*) definidas a partir de um algarismo 3-bit que mistura os tons vermelho, verde e azul. A regra enunciada

acima é denominada Regra 150, pois a sua aplicação às ordens de vizinhanças fundamentais (111); (110); (101); (100); (011); (010); (001); (000), produz o algarismo 10010110, que é a correspondência binária para o algarismo decimal 150 em 8 bits (*Figura 17*).

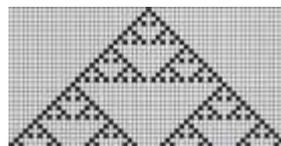
111	→	■ ■ ■	=	□	0
110	→	■ ■ □	=	■	1
101	→	■ □ ■	=	□	0
100	→	■ □ □	=	■	1
011	→	□ ■ ■	=	■	1
010	→	□ ■ □	=	□	0
001	→	□ □ ■	=	■	1
000	→	□ □ □	=	□	0

Figura 17: Algarismo 8-bit (10010110) obtido como resultado da combinação de numerais 3-bit, representações algébrica e gráfica. Fonte: ilustração nossa.

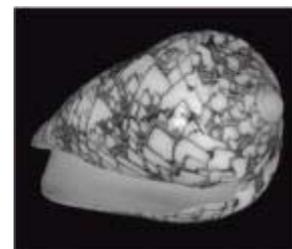
Outras regras como essa foram especialmente exploradas, por sua similaridade com estruturas gráficas naturais. É o caso da Regra 90 (01011010), que é uma das que possui disposição simétrica (*Figura 18a*). A aplicação dessa regra a uma sequência de gerações iniciada com apenas uma célula preta ao centro ($t = 0 \rightarrow \dots 000010000\dots$), revela-se um padrão geométrico de triângulos de diferentes tamanhos. Sua aplicação sucessiva produz a formação de um padrão geométrico bastante conhecido, o Triângulo de Sierpiński (*Figura 18b*), desenvolvido pelo matemático polonês Waclaw Sierpiński, que utilizou essa configuração para investigação de um padrão fractal (SIERPÍŃSKI, 1970). Esse padrão geométrico está entre os que mais chamam a atenção, por sua semelhança com texturas encontradas nas superfícies de algumas espécies de invertebrados marinhos (*Figura 18c*).



a. Representação gráfica.
 Fonte: <http://www.wolfram.com>



b. 30 gerações: simetria fractal.
 Fonte: <http://www.wolfram.com>



c. Espécie do caracol marinho Conus textile neovicarius.
 Fonte: <http://www.coneshell.net>

Figura 18: Padrões geométricos revelados com a aplicação sucessiva da Regra 90.

Em síntese, podem-se destacar três características fundamentais dos autômatos celulares:

- Uniformidade: todas as células são atualizadas pelas mesmas regras;

- Sincronismo: todas as células são atualizadas simultaneamente;
- Localidade: todas as regras são de natureza local.

Uma ilustração completa dos 256 autômatos celulares elementares ($r = 1$ e $k = 2$), é fornecida no Apêndice A, utilizando uma configuração inicial com apenas uma célula central viva (...□□□■□□□...).

Além do tradicional *slot* quadrado e o empilhamento de gerações, outras possibilidades gráficas foram experimentadas, como os *slots* hexagonais, triangulares e tridimensionais. Dentre as experimentações que mais chamaram a atenção estão as configurações polares propostas por Shulman e Seiden (1986), que utilizaram os CA_{1D} como uma fita de células polares com anéis radiais de diferentes tamanhos. Investigando uma ampla quantidade de padrões, os autores produziram algumas configurações espiraladas que se assemelham ao padrão geométrico de galáxias. Em uma disposição de *slots* radiais (*Figura 19a*), a vizinhança $r = 1$ altera os estados das células do próximo anel, a partir de regras baseadas em rotação diferencial. Os resultados da aplicação recursiva de uma dessas regras a partir de simulações computacionais, revelaram uma espiral formada por células pretas, ou 1's, com um núcleo central de células brancas, ou 0's (*Figura 19b*). Essa configuração se assemelha, por exemplo, ao padrão da galáxia Messier 74, registrada pelo telescópio espacial Hubble, que contém um ambiente rico em estrelas e um núcleo central brilhante, formado por gases e é um pouco menor do que a nossa Via Láctea (*Figura 19c*).



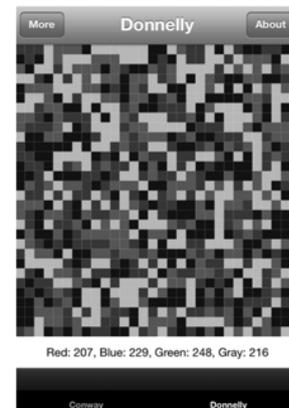
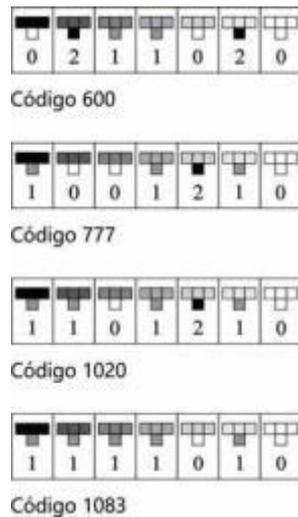
Figura 19: CA_{1D} de configuração radial.

Em quaisquer disposições gráficas para a vizinhança, observa-se sempre que pequenas mudanças de regras proporcionam resultados completamente distintos. Além disso, a quantidade de configurações possíveis cresce exponencialmente a cada aumento do tamanho

da vizinhança ou da quantidade de estados. Um acréscimo de células à vizinhança mínima tornando-a, por exemplo, $r = 2$ (ao invés do $r = 1$), produz $2^5 = 32$ possibilidades de vizinhança, e não mais as 8 anteriores. Já as 256 (2^8) regras básicas, agora ultrapassariam 4 bilhões: 4.294.967.256 de regras, precisamente 2^{32} . Por outro lado, mantendo-se a vizinhança mínima $r = 1$ e acrescentando um estado possível, isto é, $k = 3$, produz-se $3^3 = 27$ combinações possíveis e astronômicas 7.625.597.484.987 regras (3^{27}), que é uma quantidade considerável de variáveis para grande parte dos problemas que envolvem a complexidade (TOFFOLI e MARGOLUS, 1987).

A dificuldade de computar autômatos celulares de elevada complexidade motivou, no início da década de 1980, o desenvolvimento de alguns métodos, a fim de facilitar a identificação de características em padrões geométricos complexos. Dentre eles, o método de somar os estados da vizinhança, conhecido como método das regras totalizantes⁵, se caracterizou com um dos mais precisos (WOLFRAM, 1984). Exemplos de regras totalizantes em estados ternários (de base três) são mostrados na *Figura 20a*, nos quais se utilizaram também tons de cores médios nas células das vizinhanças em uma correspondência com a média dos ternários. O valor resultante é a célula central na geração seguinte com uma das três cores: branco, cinza e preto, significando, respectivamente, 0, 1 e 2. Diversas conclusões foram possíveis a partir dessa correspondência cromática, como a atualização das áreas cobertas por cada um dos estados. Esse raciocínio foi utilizado no autômato celular proposto por Donnelly, no qual as células de mesma cor tendem a se agrupar ao longo de muitas gerações, independentemente da geração inicial (*Figura 20b*).

Embora nas ideias seminais de von Neumann a fita de células de um autômato seja infinita, na prática ela deve ser suficientemente grande para descrever um processo desejado. Existem algumas estratégias para o tratamento das células nas extremidades esquerda e direita da fita. As maneiras de se definir esses limites se concentram, basicamente, em três das seguintes condições pré-estabelecidas: 1) Periódica, na qual se consideram as extremidades direita e esquerda vizinhas uma da outra, assim a fita de células se fecha como um anel; esse procedimento pode ser aplicado também na direção vertical e, nesse caso, as extremidades superior e inferior são consideradas vizinhas; quando esses dois procedimentos são adotados tem-se uma configuração contínua como um toroide e, desse modo, simula-se uma configuração infinita de células (*Figura 21a*); 2) Refletiva, na qual fornece-se às extremidades esquerda e direita os mesmo estado de suas células vizinhas (*Figura 21b*); 3) Fixa, na qual escolhe-se um valor estado fixo para as extremidades (*Figura 21c*).



a. Quatro exemplos de regras totalizante e juntamente com a uma proposta de correspondência cromática.
 Fonte: Wolfram (2014).

b. Autômato celular de Donnelly, mostrado na tela de um aplicativo para smartphones.
 Fonte: <http://www.applestore.com>

Figura 20: Algumas estratégias para a computabilidade de autômatos celulares de elevada complexidade.

Os arremates das extremidades de um CA_{1D} podem ser mais interessantes dependendo dos aspectos desejados na simulação de um comportamento. Extremidades reflexivas podem ser úteis, por exemplo, se aplicadas a autômatos que apresentam simetria. Um exemplo clássico do estabelecimento de condições fixas para as extremidades é a proposta do Triângulo de Pascal, que também pode ser descrita com a utilização da Regra 90 (Figura 22a). O triângulo foi descoberto pelo matemático chinês Yang Hui e 500 anos depois suas propriedades matemáticas foram estudadas pelo francês Blaise Pascal, que o descreveu por números binomiais (WOLFRAM, 1984). A recursividade do Triângulo de Pascal manifesta a própria similaridade (Figura 22b), do mesmo modo que padrão geométrico da Regra 90 é uma figura autossimilar como um tipo de fractal (MANDELBROT, 1982; AHARONY, GEFEN e KANTOR, 1984).

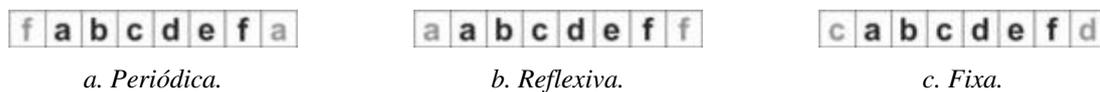
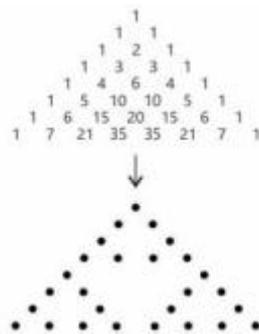


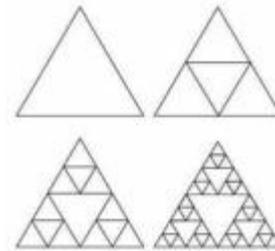
Figura 21: Condições estabelecidas para as extremidades dos CA_{1D} . Fonte: Schiff (2008).

Por outro lado, alguns CA_{1D} se comportam de maneira completamente diferente, principalmente com o acréscimo de muitas gerações. O comportamento da Regra 306, por exemplo, produz padrões aleatórios a partir de 60 gerações. Considerando a coluna central de células que tem estados 1101110011..., Wolfram (1986) aplicou vários testes estatísticos e encontrou uma sequência completamente aleatória. De fato, uma aleatoriedade determinística,

fundamentada em relações de causalidade, já que a sequência executada em todos os instantes de tempo é conhecida. No entanto, nenhum padrão geométrico pode ser discernido, pelo menos não no sentido de antecipação por questões de repetição formal. Sob esse ponto de vista eles podem ser considerados aleatórios.



a. Triângulo de Pascal e Regra 90.



b. Auto similaridade fractal.

Figura 22: CA_{1D} e comportamentos periódicos. Fonte: Wolfram (2014).

Vários argumentos reforçam essa ideia de aleatoriedade na Regra 30, tais como o aparecimento frequente de triângulos brancos e um padrão de riscas bem definidas do lado esquerdo, embora a estrutura como um todo não apresente um padrão discernível. O número de células pretas ao longo das gerações é também variável: 1, 3, 3, 6, 4, 9, 5, 12, 7, 12, 11, 14, 12, 19, 13, 22, 15, 19, ..., (THE OEIS FOUNDATION INC., 2010). Baseando-se nessa aleatoriedade, Wolfram (1986) propôs utilizar a coluna central da Regra 30 como um algoritmo gerador de números inteiros pseudoaleatórios (Pseudorandom Number Generator, PRNG, ou Deterministic Random Bit Generator, DRBG), que são gerados, por exemplo, em sistemas eletrônicos de sorteio de números.

Analisando comportamentos periódicos como o da Regra 90, ou aleatórios como o da Regra 30, Langton (1986) buscou classificar os autômatos celulares sob a mesma perspectiva dos sistemas dinâmicos. Os sistemas dinâmicos são um conceito matemático, no qual se procura estabelecer uma relação de dependência entre o tempo e um ponto de um espaço geométrico. Os exemplos mais comuns da modelagem matemática desses sistemas incluem o balanço do pêndulo do relógio ou o fluxo de água em um tubo. Em qualquer instante de tempo, um sistema dinâmico tem um estado determinado por um conjunto de números reais definidos por uma regra fixa que descreve os estados futuros a partir do estado atual. Essa regra é determinística, ou seja, para um determinado intervalo de tempo apenas um estado futuro decorre do estado atual. Sob essa perspectiva, os 256 autômatos celulares elementares podem ser agrupados em

quatro classes básicas em uma ordem crescente complexidade: Fixa, Periódica, Complexa e Caótica.

Embora alguns CA se misturem em diferentes classes, pertencendo simultaneamente a duas delas, a maioria deles pode ser classificada por essa linha de evolução, de um sistema mais elementar para um mais complexo. Além disso, essa classificação pode ser externada para além dos autômatos celulares elementares:

- Classe I - Fixa: É o comportamento mais simples e que envolve a constante uniformidade. Essa classe de autômatos assemelha-se aos sistemas dinâmicos que tendem a ser atraídos por um ponto fixo. Em quaisquer configurações iniciais de células, o autômato se envolve nesse estado fixo e essa configuração inicial é perdida (*Figura 23a*).
- Classe II - Periódica: Nesse caso, a evolução caminha para estruturas continuamente repetidas ou periódicas. Essa classe de autômatos assemelha-se aos sistemas dinâmicos de comportamento periódico e, comumente, os sistemas desta classe têm os domínios de extensão de células finitos. Diferentes periodicidades podem ser obtidas dependendo do tamanho do domínio estabelecido, nas quais condições de extremidades periódicas são utilizadas. O autômato eventualmente encontra alguma geração anterior que o força a repetir o seu comportamento (*Figura 23b*).
- Classe III - Complexa: Estes autômatos exibem um comportamento tipicamente aleatório com a presença de padrões geométricos triangulares. Essa classe assemelha-se aos sistemas dinâmicos caóticos. Os autômatos dessa classe foram os que mais contribuíram com os estudos estatísticos de aleatoriedade que utilizaram autômatos celulares (*Figura 23c*).
- Classe IV - Caótica: embora as classes I, II e III demonstrem comportamentos típicos encontrados nos sistemas dinâmicos, o comportamento da classe IV não tem equivalência com qualquer sistema dinâmico. Pode-se dizer que esta classe se ajusta entre as classes II e III, no sentido de que pairam entre a periodicidade e a aleatoriedade. Essa região intermediária foi denominada de Borda do Caos (Edge of Chaos), termo cunhado por Norman Packard (LEWIN, 2000). A característica relevante desta classe é que algumas informações podem ser verificadas em outros instantes de tempo. Além disso, nestes autômatos é comum células pretas e brancas se revezarem, formando no mesmo tempo padrões periódicos e aleatórios (*Figura 23d*).

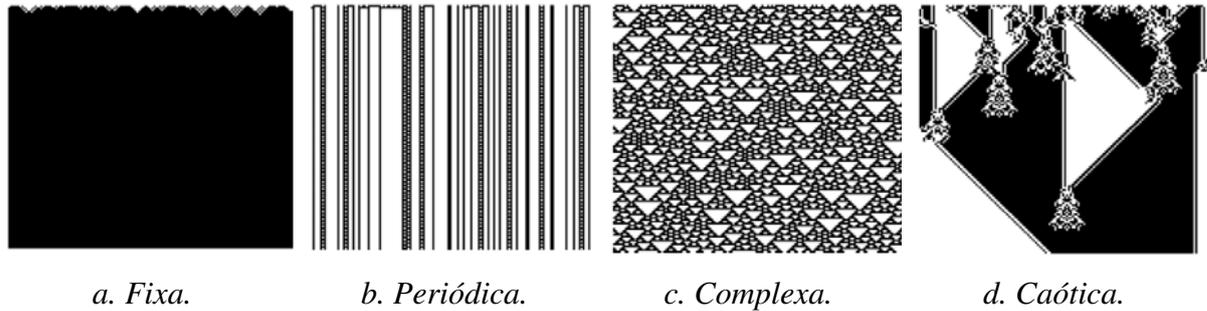


Figura 23: Exemplos de autômatos celulares elementares (CA_{1D}) de cada uma das classes. Fonte: Schiff (2008).

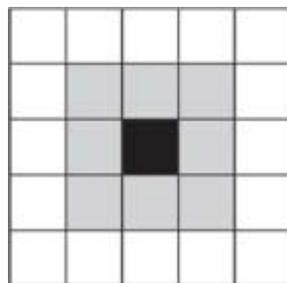
Embora essa classificação seja satisfatória para a maioria dos casos, algumas questões sobre a evolução de certos autômatos celulares são peculiares, alternando o comportamento entre as classes. Em alguns casos, o comportamento inicial de uma classe acaba "morrendo" ao atingir determinada geração para que outro comportamento "nasça" imediatamente. Nos autômatos celulares elementares comportamentos desse tipo não são verificados, mas com o aumento dos estados possíveis ($k > 2$), já se percebem a frequência de algumas dessas ocorrências. Langton (1990) estabeleceu um parâmetro, denominado de valor λ ou Parâmetro de Langton, que estabelece estatisticamente domínios mais ou menos heterogêneos nos CA, permitindo identificar suas classes e transição. Essa discriminação dinâmica funciona razoavelmente bem para grandes valores de k .

2.4 AUTÔMATOS CELULARES BIDIMENSIONAIS E O JOGO DA VIDA

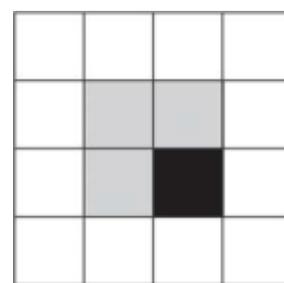
Embora os autômatos celulares bidimensionais apresentem maior complexidade que os unidimensionais, eles foram os primeiros a serem desenvolvidos, já que os modelos de reprodução artificial de von Neumann foram implementados em malhas 2D. Os CA_{2D} apresentam as mesmas características fundamentais dos CA_{1D}, mas com vizinhanças em duas direções ortogonais. No entanto, três tipos fundamentais dessas vizinhanças foram predominantemente considerados. Além da própria Vizinhança de Neumann, utilizada em sua máquina auto replicante, a Vizinhança de Moore ou Nine-Cell Moore (WEISSTEIN e WOLFRAM, 1999) consistiu de uma malha quadrática, com uma célula ao centro e vizinhos em todas as direções (*Figura 24a*). Na forma mais fundamental ($r = 1$), consiste de um arranjo de nove células, ou oito células envolvendo uma célula central. Ambas as vizinhanças, de Neumann e de Moore, são úteis na solução de diversos problemas, em diferentes contextos. Comumente utiliza-se a notação (i, j) para referenciar a posição horizontal e vertical de uma

célula no tempo t , denotada por $c_{ij}(t)$. Enquanto em um CA_{1D} elementar o arranjo $k = 2$, e $r = 1$ permite $2^3 = 8$ possíveis vizinhanças, nos CA_{2D} com a mesma situação na Vizinhança de Moore existem $2^9 = 512$ possibilidades de vizinhança, desde o arranjo com todas as células brancas até o arranjo com todas as células pretas, passando pelas outras 510 possibilidades entre elas. Nessa condição um número astronômico de regras é possível, precisamente 2^{512} ou 10^{154} . Com a Vizinhança de Neumann esse número é reduzido para $2^{32} = 10$ bilhões.

A maioria das implementações de CA_{2D} utilizaram esses dois exemplos de vizinhança. No entanto, uma vizinhança mais recente foi imaginada por Margolus (*Figura 24b*), fundamentalmente diferente das duas anteriores. Esta consiste na divisão da fita de células em partes, utilizando o caso bidimensional mais simples, que são os blocos de células 2×2 . Nesse caso, as regras de transição atualizam o bloco como uma entidade distinta, ao invés de célula individual. Uma característica única da Vizinhança de Margolus é que existem sobreposições, nas quais uma célula pode pertencer simultaneamente a mais de uma vizinhança e alterar de maneira diferente cada uma delas ao longo das gerações. Esse tipo de vizinhança foi amplamente utilizado em autômatos celulares que simulam o comportamento de gases e outros comportamentos físicos (MARGOLUS e TOFFOLI, 1987).



a. Vizinhança de Moore.



b. Vizinhança de Margolus.

Figura 24: Outras vizinhanças possíveis nos autômatos celulares. Fonte: ilustração nossa.

Os primeiros experimentos com CA_{2D} efetuados em sistemas operacionais de computador tiveram início na década de 1960, no Laboratório de Los Alamos. Com um plano de quadras considerado infinito, foram experimentadas regras de transição com as quais obtiveram-se resultados empíricos. Uma dessas experimentações em particular, proposta por uma equipe coordenada por Ulam, chamou a atenção: uma célula morta (0) se tornava viva (1) na próxima geração caso possuísse como vizinha uma única célula viva na geração corrente (nesse caso utilizando a Vizinhança de Neumann). Posteriormente, os autores uniram essa regra a outra regra denominada Regra de Morte, da qual ao fazer a transição de uma geração n para uma geração posterior $n + 1$, a geração anterior $n - 1$ tinha suas células inteiramente apagadas. Assim,

apenas as duas últimas gerações sobreviviam em qualquer configuração (SCHRANDT e ULAM, 1970).

Esse experimento foi provavelmente uma das maiores influências à ideia do matemático britânico John Horton Conway em desenvolver o mais famoso CA_{2D}: o Jogo da Vida, publicado na coluna sobre jogos matemáticos da revista *Scientific American* (GARDNER, 1970). Originalmente, o Jogo da Vida era jogado em tabuleiros de xadrez ou de *go*, quando então os avanços na computação permitiram sua implementação de maneira extremamente simples, utilizando os dois estados originais (vivo = 1; morto = 0) nas oito células da Vizinhança de Moore. As seguintes regras determinavam o próximo estado de uma célula (*Quadro 2*)

Quadro 2: Regras do Jogo da Vida

Situação	Regra correspondente no Jogo da Vida
<i>Morte</i> uma célula viva (1) morrerá (0) nas circunstâncias de:	<i>Superlotação</i> : se a célula possuir 4 ou mais vizinhos <i>Solidão</i> : se a célula possuir 1 ou menos vizinhos
<i>Nascimento</i>	Possuir exatamente três vizinhos vivos (nem mais, nem menos)
<i>Êxtase</i> em todos os outros casos as células não mudarão:	<i>Permanece viva</i> : se tem exatamente 2 ou 3 vizinhos vivos <i>Permanece morta</i> : se tem qualquer quantidade de vizinhos diferente de 3.

Fonte: Adaptado de Gardner (1970).

A jogabilidade do Jogo da Vida difere de um jogo convencional, no qual os jogadores intervêm na configuração constantemente. No entanto, ele abre uma possibilidade de exploração completamente diferente da anterior, na qual uma configuração dinâmica emerge de um estado inicial e de interações locais. Variações da configuração proposta por Conway foram consideradas, principalmente com malhas triangulares e hexagonais, entretanto nenhuma delas foi alvo de tantas explorações computacionais quanto a original. Enquanto algumas explorações computacionais do jogo resultaram em configurações periódicas, outras se mostraram bastante aleatórias.

Desse modo, o Jogo da Vida é um exemplo de autômato celular de Classe IV, exibindo alguns comportamentos assíncronos que às vezes convergem para estados estacionários (BERSINI; DETOUR, 1994). Também é um exemplo de regra totalizante, em que o estado da célula central na próxima geração depende *a priori* da soma dos valores das oito vizinhanças. No entanto, os modos de visualização dos autômatos bidimensionais, são diferentes unidimensionais. Em substituição ao empilhamento de células, nos quais visualiza-se o comportamento como um

todo, nos autômatos bidimensionais visualiza-se uma geração após a outra, o que o faz parecer um quadro de animação. Ao observar as transições em um monitor de vídeo, por exemplo, ficam evidentes alguns resultados intrigantes em relação a outros que permanecem estáticos.

A partir dos conceitos de morte e vida foram caracterizadas Formas de Vida elementares, que são gerações iniciais do Jogo da Vida, capazes de representar praticamente os conceitos mais amplos dos CA2D. Em linhas gerais, três situações contemplam esses conceitos: 1) formas de vida de 3 células: podem resultar rapidamente em processos de extinção, ou formar um bloco estático, que permanece por todas as gerações subsequentes; algumas configurações ainda oscilam de maneira cíclica a sua disposição; 2) formas de vida de 4 células: envolvem tanto comportamentos estáticos quanto variáveis; 3) formas de vida de 5 células (também denominadas de R-pentomino): também envolvem tanto comportamentos estáticos quanto variáveis, mas chegam a apresentar estabilidade depois de mais de 1000 gerações em comportamento variável. As principais formas de vida do Jogo da Vida, são as seguintes (WEISSTEIN, 2009).

- Invariantes (*Invariant forms*): são as configurações que permanecem imutáveis ao longo de todos os instantes de tempo. Dessas, a forma bloco (1) é a mais comum, em que cada célula tem exatamente três vizinhos adjuntos. Outras formas de vida invariável são classificadas fazendo alusão a formas semelhantes: um padrão com quatro células vivas recebe o nome de banheira (2); com seis células, os padrões geométricos são colmeia (3), navio (4) e cobra (5); com sete células, os padrões anzol (6) e pão (7); e com oito células, o padrão lagoa (8) (*Figura 25*).

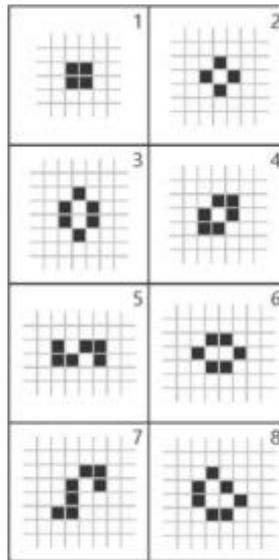


Figura 25: Formas de vida invariantes. Fonte: Weisstein (2009).

- Osciladores (*Oscillators*): são as configurações que exibem um comportamento periódico, oscilando indefinidamente entre um número fixo de configurações. Alternam entre dois ou mais estados distintos, embora os casos de oscilação entre dois períodos sejam os mais comuns. A quantidade de períodos pode variar entre 3 e 18, embora implementações computacionais tenham obtido osciladores com períodos maiores, como a pesquisa de Achin Flammenkamp que desenvolveu um padrão geométrico para o Jogo da Vida capaz de se repetir a cada 144 gerações (ADAMATZKY, 2010). Gerações de um oscilador são mostradas na Figura 26.

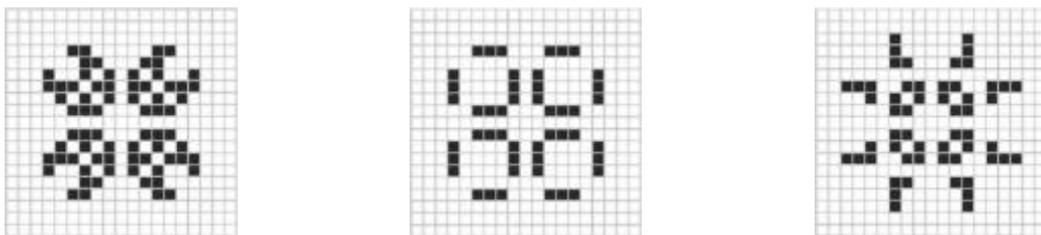


Figura 26: Três formas de vida alternantes do oscilador CP-Pulsar. Fonte: Schiff (2008).

- Planadores (Gliders): essa forma de vida foi desenvolvida pelos pesquisadores do Gosper's Group do MIT. Tratam-se de configurações de 5 células que "movem" diagonalmente uma célula a cada 4 instantes de tempo. Elas são chamadas de planadores, pois no instante $t + 2$ essa linha de células diagonal é espelhada tomando a forma de um avião planador. No instante de tempo $t + 4$ o planador é espelhado novamente para a sua diagonal original, essa última deslocada de uma célula. Esse ciclo de tempo $t = 4$ é repetido intermitentemente (SILVER, 2009). Quando rodado em sequência em um

monitor de vídeo, o planador parece entrar em movimento, em uma espécie de "dança desajeitada". Nas palavras de Grand (2001, p. 40): "[...] o planador é algo, um fenômeno persistente coerente que se move através do espaço e ainda não está separado ou sobreposto ao mesmo. É simplesmente a auto propagação a partir de uma perturbação por pequenas regras [...]"⁷. A velocidade máxima de propagação de uma célula para outra (horizontalmente, verticalmente ou diagonalmente) é de uma célula por geração. Em novembro de 1970, o mesmo grupo de pesquisadores do MIT desenvolveu um padrão geométrico capaz de emitir simultaneamente um oscilador (denominado de metralhadora), juntamente com os planadores. Esse padrão ficou conhecido como Glider Gun¹³ e chamou a atenção, pois, pela primeira vez dois períodos distintos foram considerados (*Figura 27a-d*).

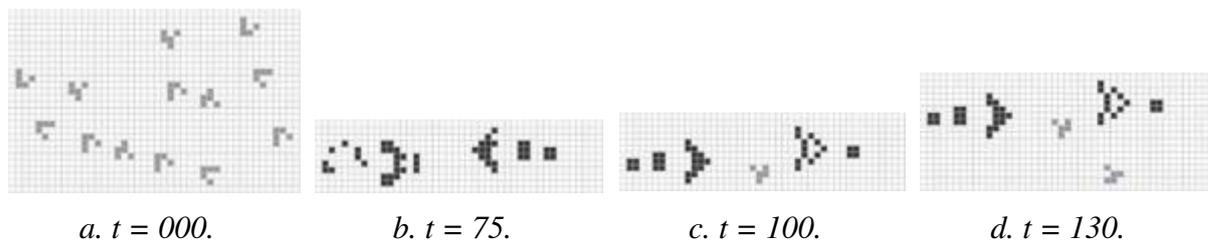


Figura 27: Gerações do Glider Gun. Fonte: Silver (2009).

- Configurações Matusalém (*Methuselah Configurations*): são as configurações com menos de 10 células iniciais que produzem um grande número de formas de vida antes de se estabilizar, mas outras configurações com o mesmo comportamento foram obtidas como mais células de início. A forma estabilizada (sobrevivente) é chamada de um Matusalém, em referência ao personagem que, segundo a bíblia, viveu 969 antes de morrer. Nos exemplos mais comuns, tem-se um R-pentonimo após 1103 gerações, depois de variar 6 configurações ao longo das mesmas. Outras formas de vida do mesmo tipo foram desenvolvidas e batizadas pela semelhança de sua forma remanescente. Dentre as mais célebres, a Bolota, que sobrevive após 5206 gerações, desenvolvida por Charles Corderman; e o Coelho desenvolvida por Andrew Trevorrow, que se estabiliza após 17.331 gerações após oscilar entre vários ciclos de dois períodos e variar 39 configurações (*Figura 28a-c*).

¹³ Metralhadora do planador. Tradução Nossa.

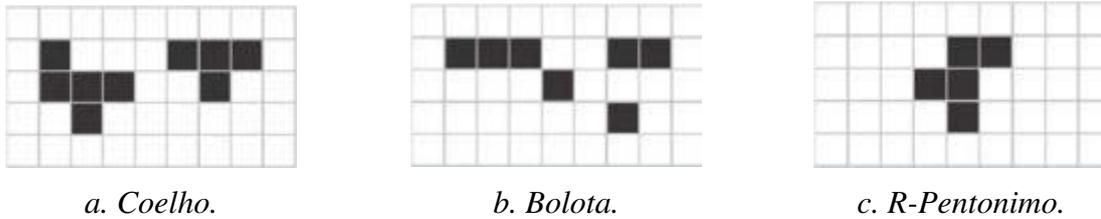


Figura 28: Exemplos de formas de vida Matusalém. Fonte: Adamatzky (2010).

Jardim do Éden (Garden of Eden): como mencionado, a evolução dos autômatos celulares é governada por funções de transição locais que alternam os estados das células em uma ordem sincrônica em instantes de tempo discretos. Desse modo, o padrão de células formado muda para outros padrões. No entanto, a questão sobre a existência de padrões de células que não surgem jamais, durante toda a evolução, exceto nas condições iniciais, vem sendo respondida ao logo dos anos, por longos processos computacionais e desenvolvimentos matemáticos. Uma forma de vida cuja a configuração não surge em nenhum instante de tempo posterior, ou seja, que não possui antecessores, é um padrão chamado de Jardim do Éden. O termo é atribuído a John Turkey e é também uma referência ao local destinado por Deus a Adão e Eva, antes do pecado, segundo a Bíblia. A partir dessa definição, esse padrão geométrico apresenta-se como um teorema de existência e não como um padrão recorrentemente a ser observado. Pelo fato do Jogo da Vida possuir configurações repetitivas e também configurações que se extinguem, as conjecturas sobre os Jardim do Éden têm sido investigadas, a fim de estabelecer a infinitude dos CA_{2D} . Um exemplo dessa forma de vida é mostrado na *Figura 29*, de autoria de Achin Flammenkamp.

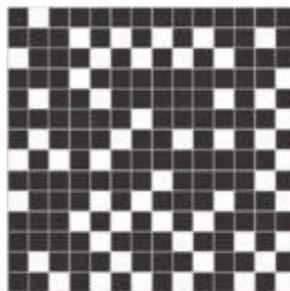


Figura 29: Exemplo de uma forma de vida Jardim do Éden. Fonte: Schiff (2008).

Embora o Jogo da Vida tenha sido de longe a aplicação de mais sucesso dentro dos autômatos celulares bidimensionais, uma quantidade inumerável de CA_{2D} foram desenvolvidos ao longo dos últimos 30 anos de aplicações em diversos ramos da ciência. Os CA_{2D} são rápidos e fáceis de implementar, além disso, frequentemente, a resposta visual obtida se assemelha aos padrões experimentados de outras formas empíricas. Assim, os autômatos celulares são uma maneira de

formalizar teoricamente os mecanismos vivenciados na prática em termos computacionais. Esses aspectos são, provavelmente, as duas grandes possibilidades dos CA em relação as outras abordagens mais tradicionais (ERMENTROUT e EDELSTEIN-KESHET, 1993).

Dentre essas explorações computacionais inspiradas em processos biológicos, os modelos baseados em autômatos celulares estão entre as implementações de maior aplicação em áreas externas à Ciência da Computação, como as Engenharias e as Ciências Sociais Aplicadas. Nas considerações de Langton (1990) "[...] o entendimento da vida por meio de tentativas resumidas a princípios dinâmicos fundamentais subjacentes aos fenômenos biológicos, possibilita recriar seus dinamismos em outras mídias, como os computadores, tornando-as acessíveis a novos tipos de manipulações e testes experimentais."

Esses experimentos têm sido cada vez mais frequentes na área do Design Computacional, a fim de reproduzir formas espaciais de elevada complexidade, a partir de regras relativamente simples. No entanto, mesmo podendo ser tridimensionais, nem sempre a utilização conceitual dos autômatos celulares leva a cabo a sua noção 3D, isto é, com malhas cúbicas de *slots*¹⁴ e uma vizinhança padrão de 27 células. Em alguns casos, visando otimizar a manipulação computacional, utilizam-se muitos conceitos provenientes das noções de CA_{1D} e CA_{2D}, articulando-os com estratégias que conferem uma tridimensionalidade aos padrões gráficos gerados, como a extrusão, por exemplo. No item que se segue mostram-se algumas aplicações específicas dos autômatos celulares no campo do Design Computacional.

2.5 APLICAÇÕES DOS AUTÔMATOS CELULARES NO DESIGN COMPUTACIONAL

Do mesmo modo que podemos considerar linhas unidimensionais ou malhas bidimensionais, agrupamentos tridimensionais de células podem ser produzidos considerando os mesmos princípios fundamentais nas direções X, Y e Z. Entretanto, o universo imenso e ainda inexplorado dos autômatos bidimensionais faz deles uma ferramenta muito utilizada no Design Computacional. Utilizando estratégias complementares a *computabilidade* dos autômatos, como a extrusão ou a interpolação, é possível estabelecer incontáveis transformações em objetos, como a de um cubo que se transforma gradualmente em uma pirâmide. No entanto, não é a transformação morfológica de objetos a grande vertente exploratória dos autômatos

¹⁴ Espaço a serem preenchidos com informação.

celulares, mas, sobretudo, o endereçamento de um estado original a outro estado de destino. O objeto combina características de seus antecessores e é, na verdade, fruto de uma herança de condições. O delineamento dessas condições em ambientes bidimensionais é de operacionalidade mais viável do ponto de vista da computação, o que faz das experimentações com autômatos celulares genuinamente tridimensionais, muito mais ligadas a explorações filosóficas do que de cunho estruturado. Por esse motivo, as pesquisas a seguir apresentadas, visam a aplicação do conceito no design de arquitetura considerando outras estratégias diferentes da sequência natural de incremento dos autômatos celulares.

A partir das considerações apresentadas sobre os autômatos celulares unidimensionais e bidimensionais, observa-se que, em alguns contextos, a auto-organização de células é passível de delineamento. Do ponto de vista da Teoria dos Sistemas, a auto-organização é uma propriedade considerada emergente, principalmente por expressar um comportamento coletivo dirigido a uma ou mais funções. Em recentes pesquisas da área do Design Computacional tem-se buscado combinar esse caráter funcional aos padrões geométricos gerados a partir de explorações computacionais com autômatos celulares. Relacionar esses padrões a funções específicas dentro do processo de projeto tem sido um dos grandes desafios da ciência exploratória.

A conexão da arquitetura com as propriedades verificadas nos autômatos celulares pode inspirar a geração de formas arquitetônicas a partir de padrões auto organizáveis. No entanto, a interpretação arquitetônica dos autômatos celulares não é puramente matemática e inclui um número de questões que devem ser consideradas no desenvolvimento de um modelo que, a posteriori, terá sua construção na realidade. A transição de um modelo computacional dessa natureza para elemento factível precisa envolver, necessariamente, um direcionamento das formas produzidas, para os níveis de exequibilidade das mesmas. Em outras palavras, a combinação de etapas baseadas em regras definidas a priori, automatizáveis, com etapas que exigem critério e intervenção do projetista, mais subjetivas e, portanto, não automatizáveis.

Dentro da esfera algorítmica que constitui a noção generativa, Resnick (1994) promoveu uma discussão sobre os aspectos conscientes que envolve os processos de geração de formas. Não tratando especificamente de processos que envolvem os autômatos celulares, o autor exemplificou, por meio das árvores recursivas, uma das ideias mais preponderantes na produção de um sistema generativo. Na árvore recursiva, os troncos maiores suportam a geração de troncos menores, por meio de regras ou restrições que direcionam o seu crescimento (*Figura*

30). Uma dessas restrições poderia estabelecer que o tronco primário seria necessariamente linear e ortogonal, dando origem a trocos secundários inclinados de 45° e com 50% do tamanho do tronco que o antecede. Do mesmo modo, o tamanho do tronco primário poderia também ser facilmente controlado por restrições condicionais similares. Na descrição algorítmica tem-se:

- Construa tronco de árvore;
- Se comprimento do tronco < 2 [pare]
- Se não, vire 45° à esquerda e construa tronco de árvore * 0.5; vire 45° à direita e construa tronco de árvore * 0.5;
- Volte ao início.

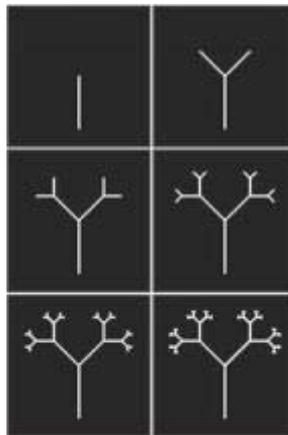
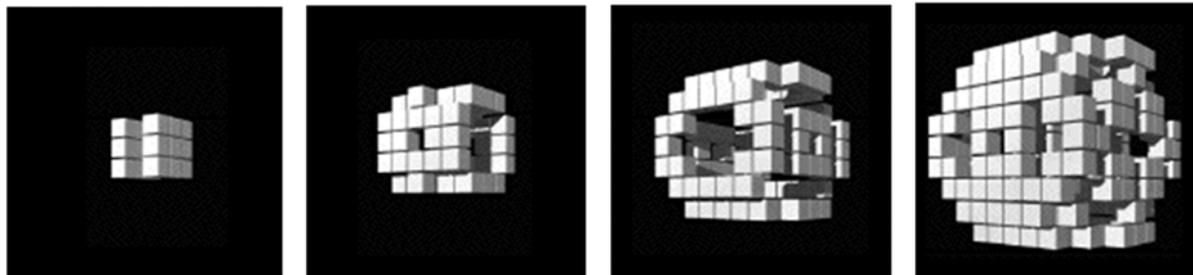


Figura 30: Árvore recursiva. Fonte: Resnick (1994).

A aplicação dessa artimanha recursiva utilizando os autômatos celulares foi proposta por Coates, Healy e Voon (1996), que buscaram explorar diversos padrões geométricos utilizando scripts dentro da plataforma AutoCAD. O objetivo foi obter configurações que pudessem ser manipuladas e aprimoradas por meio de interações locais. Desse modo, foram propostas regras para a obtenção de uma tridimensionalidade, capazes de alterar os resultados finais por meio de regras simples. A partir daí as interações observadas e as geometrias geradas foram constantemente associadas a formas típicas de arquitetura. Assim, referenciaram-se conjuntos de regras e elementos produzidos dentro das mesmas características dimensionais.

Nas conclusões dos autores, mesmo que se disponha de todas as combinações possíveis de um sistema generativo, este pode se tornar ineficaz quando os resultados se distanciam formalmente de uma solução plausível. Por outro lado, propor um método com o qual pode-se prever todos os resultados possíveis de todas as combinações iniciais significa reduzir a probabilidade do surgimento de geometrias inovadoras. Na alternativa de Coates, Hearly e Voon (1996) foram

propostos algoritmos os quais a probabilidade de emergência de um determinado padrão geométrico é mais frequente dependendo dos parâmetros iniciais. Na *Figura 31* mostram-se os resultados de uma das explorações computacionais, na qual, independentemente da variação de configurações de células, mantém-se sempre o aspecto envolpado, como nas paredes de uma edificação.



a. Configuração inicial.

b. Iteração I.

c. Iteração II.

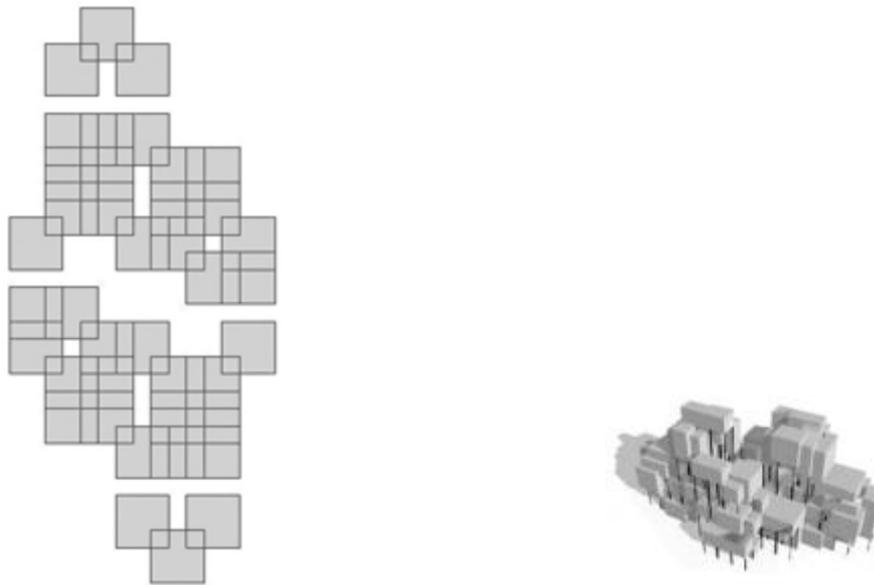
d. Iteração III.

Figura 31: Um dos experimentos de Coates, Hearly e Voon, que utilizaram autômatos celulares para a geração de formas arquitetônicas tridimensionais. Fonte: Coates, Hearly e Voon (1996).

Krawczyk (2002) também promoveu uma interpretação arquitetônica para os autômatos celulares, pensando em organizações planas de células como projeções ortogonais de uma edificação. A primeira questão investigada nesse estudo foi o desenvolvimento de configurações que pudessem representar ambientes ortogonais de uma planta típica (dormitórios, sala, banheiro, *etc.*). No entanto, a quadra como unidade fundamental foi entendida como um fator limitante a produção de disposições diagonais e, conseqüentemente, a conexão entre os ambientes. Essa dificuldade foi superada prevendo sobreposições de células de dois ou mais autômatos celulares. Desse modo, quando dois grupos de quadras se sobrepunham, as partes sobrepostas contabilizavam uma célula única e influenciavam as gerações seguintes definidoras da planta.

Além das quadras tipicamente ortogonais, uma variedade de outras formas pôde ser investigada a partir da determinação de restrições simples, cujo intuito foi apenas articular células comuns entre os autômatos (*Figura 32a*). A conexão dessas unidades, além de possibilitar a criação de grandes áreas contínuas, também pôde ser aplicada como uma ferramenta para a exploração de inúmeras formas de conexão entre edifícios, de um conjunto habitacional hipotético, por exemplo (*Figura 32b*). Embora os resultados obtidos nesse estudo sejam considerados distantes dos resultados usuais de um processo de projeto, o aspecto de maior relevância é, sem dúvida, a abordagem de projeto *bottom-up*, em que a produção de um ambiente influencia (e é

influenciado) pela definição de seu ambiente adjacente. Nesse sentido, o processo de projeto se vale necessariamente de uma noção em que os resultados são quase que exclusivamente emergentes da interação entre componentes individuais.



a. Sobreposição de células.

b. Exploração da conexão de edifícios.

Figura 32: Interpretação arquitetônica dos autômatos celulares baseada na sobreposição de células. Fonte: Krawczyk (2002).

Outras explorações computacionais correlacionando problemas de *design* e autômatos celulares foram apresentadas por Herr e Fischer (2004), que buscaram formular conjecturas sobre a produção de sistemas complexos em arquitetura. Partindo do pressuposto de que os CA são capazes de expressar computacionalmente a complexidade de algumas ações e necessidades humanas, os autores propuseram um modelo capaz de gerar fachadas, a partir de 48 subunidades individuais, operadas por meio de autômatos celulares. Esses modelos buscaram produzir respostas ao comportamento de cada habitante e vinculá-las, por meio de uma rede de controle, aos autômatos celulares. Computadas as respostas, o sistema gerou padrões geométricos dinâmicos de fachada, capazes de determinar a necessidade individual em cada ambiente, inclusive nos períodos de ociosidade. O modelo foi implementado fisicamente por meio de protótipos com a utilização de sistemas de tradução eletrônica aberta como os Arduinos¹⁵.

Juntamente com outras pesquisas, esse estudo revelou uma tendência em promover sistemas adaptativos não só em termos projetuais, mas do ambiente construído propriamente dito.

¹⁵ Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica para a interação de objetos e ambientes a partir do controle por linguagens de programação. Informações em: <http://www.arduino.cc/>

Frequentemente, os processos de concepção de ambientes envolvem elevados níveis de complexidade, sobretudo por apresentarem um dinamismo em seus usos. Com o experimento proposto, Herr e Fischer (2004) obtiveram uma integração entre a interpretação da complexidade por meio dos autômatos celulares e sua tradução para um modelo físico. Modelos como esse são extremamente úteis no estudo de processos que se atualizam ao longo tempo, de maneira responsiva, isto é, fornecendo respostas a partir de condições de exposição ambientais. A interação entre as células do autômato e sua subsequente expressão é resultado de mudanças internas externas aos sistemas que, por sua vez, produzem mudanças externas. Isso o torna um mecanismo tradutor de intenções e gerador de condições.

Em um estudo posterior, Herr e Kvan (2007), investigaram outras alternativas para o processo de projeto assistido pelos autômatos celulares, dentro dos contextos responsivo e adaptativo. Uma das questões propostas nesse estudo foi a exploração de ferramentas capazes de fornecer constantes feedbacks entre o projetista e o sistema generativo. Sob essa perspectiva, buscou-se integrar capacidades de geração de formas dos CA com as capacidades de acesso, gestão e controle da forma pelo projetista. Visando compatibilizar procedimentos generativos e métodos tradicionais de projeto, foram definidos estágios intermediários de manipulação das formas, de modo que as propriedades dos autômatos celulares foram sendo executadas em fases, intercaladas por estágios manuais de intervenção.

Na aplicação do método proposto pelos autores, foram explorados modelos virtuais 3D de um grupo de edifícios de alta densidade, interconectados entre si. As funções atribuídas aos autômatos celulares foram distribuídas entre diversas tarefas, desde arranjos espaciais para os edifícios, até propostas de configurações para os espaços comunitários e comerciais. Por outro lado, as constantes intervenções manuais corrigiam questões como o número de conexões permitidas entre os edifícios e a inclinação das torres (*Figura 33*). A partir desse experimento, concluiu-se pela eficiência da utilização dos sistemas generativos no processo de projeto, principalmente nos problemas projetuais em que é necessário contabilizar um grande número de variáveis.

A intervenção manual nos resultados obtidos molda o sistema generativo segundo funções específicas, convertendo um sistema genérico em objetivos pessoais. Nesse caso, fica clara uma negociação entre as abordagens *bottom-up* e *top-down*, já que, em alguns momentos, o sistema toma decisões "próprias" e em outros a decisão é hierarquicamente definida pelo projetista. Fischer, Fischer e Ceccato (2002) abordaram essa questão fazendo um paralelo entre as

condições espaço-tempo previstas na evolução de um autômato celular e na experiência humana. Nos ambientes granulares, comumente gerados por meio dos autômatos celulares, a medida de tempo é absoluta e está relacionada aos ciclos discretos de um computador. O grau de liberdade proveniente de um ambiente físico sugere um universo contínuo, de maneira que o espectro de soluções não fique restrito à configuração modular estabelecida.

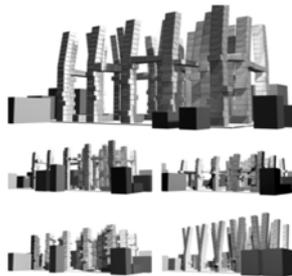


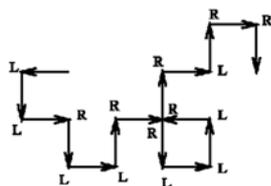
Figura 33: Resultados de uma exploração formal utilizando autômatos celulares e intervenções manuais. Fonte: Herr e Kvan (2007)

Na visão de Caillaud (2001), sistemas como esses, os quais, em alguma instância, são capazes de se auto-organizar, podem ser considerados uma espécie de morfogênese digital. Na definição biológica, a morfogênese é o processo de geração da forma de um organismo, do qual os aspectos fundamentais são a produção e a diferenciação celular. Do ponto de vista da ciência exploratória, e mais especificamente do Design Computacional, a morfogênese digital é um campo virtual de exploração de possibilidades, em que ferramentas matemáticas e computacionais são utilizadas para recriar um comportamento natural. Um dos benefícios dessa artimanha digital é a geração instantânea de um vasto número de possibilidades.

Testa et al. (2000) apresentaram uma proposta para um aplicativo utilizando os conceitos de morfogênese, denominado Estrutura de Superfície Morfogenética (MoSS, Morphogenetic Surface Structure). Nessa proposta, o aplicativo escrito na linguagem C++ permitiu definir um ambiente para influenciar o crescimento de uma superfície por meio de limites que atraem e repelem a direção do crescimento. As influências na geração da forma geométrica foram descritas por meio de axiomas sequenciais em *L-systems*¹⁶, representadas por cadeias textuais que subentendiam ações gráficas. A partir de um pequeno conjunto de letras permutáveis, por exemplo, foi possível produzir um padrão geométrico de linhas que giram sequencialmente 90°

¹⁶ L-system ou Sistema de Lindenmayer é um tipo de gramática formal que consiste de um alfabeto de símbolos utilizados na construção de uma estrutura geométrica que se expande em diferentes direções, com base nessa cadeia de símbolos.

(Figura 34a), representando um processo de morfogênese para uma superfície (Figura 34b), quando consideradas várias vezes a aplicação do axioma (gerações).



a. Construção geométrica orientada pelos L-systems.



b. Superfície morfogênica.

Figura 34: Noções desenvolvidas no aplicativo MoSS. Fonte: Testa, et al. (2000).

A ideia artificial da morfogênese foi também utilizada pelo escritório de arquitetura Morphocode, desenvolveu recentemente uma das primeiras extensões baseadas em autômatos celulares utilizando scripts visuais. O *add-on Rabbit* utiliza a notação antropomórfica de células vivas coloridas e células mortas incolores, para a geração automática de configurações geométricas de CA. No padrão básico, o *Rabbit* utiliza regras similares às do Jogo da Vida: uma célula sobrevive na próxima geração se rodeada por x vizinhos vivos, ou ganha vida se cercada por y vizinhos vivos; caso contrário, ela morre (Figura 35). Tanto a vizinhança quanto os estados podem ser alterados por meio de *scripts* visuais. Desse modo é possível explorar a formação de padrões geométricos espaciais, além da investigação de noções de auto-organização e emergência. Desde seu lançamento, o *add-on*, de distribuição gratuita, teve mais de 10 mil downloads (DIMITROVA e KIRIL, 2014).



Figura 35: Um dos resultados do Rabbit 3D. Fonte: <http://www.morphocode.com>

Recentemente, scripts textuais e visuais têm sido amplamente utilizados em *workshops* da Architectural Association¹⁷, incluindo a aplicação de algoritmos generativos baseados em

¹⁷ Architectural Association (AA) é a mais antiga escola de arquitetura independente de Londres. Informações em: <http://www.aaschool.ac.uk/>

autômatos celulares a diversos cenários arquitetônicos, que exibem resultados complexos e emergentes. Nesse processo foram utilizadas noções 2D oriundas do Jogo da Vida, a fim de produzir padrões tridimensionais a partir do empilhamento de planos. Depois de estabelecida, as configurações 3D foram moldadas segundo a tipologia arquitetônica procurada. Desse modo, a informação adquirida forneceu pistas sobre quais conjuntos de parâmetros forneciam outputs mais adequados ao processo de modelagem 3D de um determinado elemento arquitetônico. Com o auxílio de modelos físicos produzidos em impressoras 3D (*Figura 36*), os modelos foram analisados e categorizados segundo sua aproximação com padrões geométricos pré-estabelecidos (SAYED, ARANCHII et al., 2014).



*Figura 36: Um dos resultados obtidos em workshops na AA em Londres.
Fonte: <http://www.suckerpunchdaily.com>*

Dentro do panorama contemporâneo de produção do espaço arquitetônico os autômatos celulares oferecem um sistema generativo eficiente, principalmente nas situações em que exigem algum grau de repetição de tarefas e um número elevado de elementos formais. Como resultado das pesquisas em Design Computacional utilizando os autômatos celulares, têm sido delineadas potencialidades dessa estratégia noção discreta, porém com um número ainda limitado de resultados arquitetônicos, propriamente ditos. A proposta atual de integrar processos *bottom-up* para a geração de formas complexas vinculadas a capacidades *top-down* de controle do desenvolvimento da forma sinaliza com um panorama consistente de utilização dos sistemas generativos de projeto. No entanto, ainda é clara a dependência de elevados níveis de controle para a aproximação de formas exequíveis, o que de fato constitui um desafio à ciência da área.

Em síntese, o conceito de emergência, que é expressão da noção de complexidade do ponto de vista biológico, teve origens na Teoria da Evolução e aperfeiçoamentos ao longo do século XX, pela Teoria dos Sistemas, e pelo Instituto de Santa Fé, a partir década de 1960. A apropriação desse conceito pela Computação Científica e pela Inteligência Artificial teve início demarcado

pela ciência produzida nos laboratórios Bell e por diversas explorações computacionais posteriores. Dentre as diversas aplicações do conceito pelo ramo do Design Computacional, os autômatos celulares têm se constituído em uma das principais ferramentas generativas de características quase que exclusivamente *bottom-up* e grande parte dos desafios das pesquisas em arquitetura que se utilizam dessa noção buscam aproximar os padrões geométricos produzidos das condições necessárias à sua exequibilidade.

Capítulo Três

Estruturas espaciais: *design*, evolução e perspectivas

“

Cada vez que a tecnologia de produção da arquitetura muda, então a arquitetura também muda.”

———— CONRAD WASCHMANN, 1962

Trecho do artigo *The Turning Point of the Building*
publicado no periódico *Structure and Design*

Desde muito antes da regulamentação das profissões, arquitetos e engenheiros buscam novas maneiras de resolver problemas. É algo intrínseco à formação desses profissionais; faz parte da sua essência, da sua natureza. No entanto, buscar novas maneiras de resolver problemas nem sempre é tarefa fácil. Além da criatividade, fatores como viabilidade, produtividade e tecnologia, são sempre variáveis da árdua equação que resulta em algo novo. Mas o fator motivador que sintetiza essa busca é mesmo o desafio, algo presente no sentido das palavras como o próprio radical que dá origem ao nome dessas profissões, como "arquitetar" ou "engenhoca". O desafio é, sem dúvida, um dos fatores que proporcionou o surgimento das estruturas denominadas espaciais, tanto o desafio de vencer vãos maiores, quanto o desafio da complexidade formal.

A madeira provavelmente foi o primeiro material empregado nas estruturas espaciais e atualmente é utilizada nas formas serrada, em toras, ou laminada e colada. Já as estruturas espaciais em concreto, mais densas inclusive visualmente, se tornaram uma alternativa em

países como a Índia. Os plásticos, por sua vez, têm sido utilizados mais em pesquisas experimentais, com utilização mais comum nas estruturas reforçadas com fibra de vidro (*Glass Fibre Reinforced*), mas sua difusão na construção civil ainda é tímida pois, apesar de apresentar relações de peso e resistência mais favoráveis do que muitos materiais, a dilatação térmica e a deterioração com a exposição à luz ultravioleta estão entre as limitações a serem superadas. Recentemente, a estrutura tubular em papelão reciclado proposta por Shigeru Ban, na Expo 2000 em Hanover, chamou a atenção ao cobrir aproximadamente 3.000 m² (AMBASZ, 2001).

Nenhum desses materiais foi tão explorado nas estruturas espaciais quanto os metais. Por serem o aço e o alumínio materiais puramente industrializados e de elevada homogeneidade, sua aplicação é muito favorável a esses tipos de estruturas. Além disso, a ampla aplicação dos metais nos setores automotivo e aeroespacial aproximou conceitos utilizados nas linhas de produção dessas indústrias com a construção civil, de modo que a evolução das estruturas espaciais incorporou os mesmos desafios e inovações ao longo dos anos (NARAYAN, RAO e SARCAR, 2008). Neste capítulo, serão abordados diversos conceitos relacionados às estruturas espaciais metálicas de aço e de alumínio, por sua consolidação e predominância histórica depois da revolução industrial e ao longo do século XX. Esse recorte obviamente não encerra o tema das estruturas espaciais no uso desses materiais, tampouco restringe as explorações formais às suas características industrializadas. A arquitetura de estruturas espaciais é uma história de experimentações e enquanto experimentações esses recortes são meramente analíticos.

3.1 BREVE EVOLUÇÃO DAS ESTRUTURAS ESPACIAIS

Até meados do século XVIII, os principais materiais utilizados na construção civil haviam sido a pedra, a madeira e o tijolo. A utilização dos metais nesse período seria praticamente inexistente, não fossem os elementos de ligação para os materiais mencionados. As estruturas espaciais desse período concentraram-se, praticamente, nas cúpulas e nas abóbadas. Desde o fim do período medieval, essas estruturas vinham sendo utilizadas para vencer grandes vãos. As basílicas de Santa Maria del Fiore, concluída em 1434, em Florença, e de São Pedro, concluída em 1593, em Roma, estão entre as estruturas de maiores vãos construídas nesse período, com aproximadamente 42 metros de diâmetro cada uma. Em madeira, o templo Todai-ji, concluído em 1708 em Nara, Japão, está entre as maiores construções já realizadas com esse material, com um vão de aproximadamente 57 metros (BENEVOLO, 2002).

A revolução industrial viria a controverter toda a ideia de materiais de construção, a partir da produção do ferro e, posteriormente, do aço, um material leve, homogêneo, com níveis de resistência à tração e compressão praticamente idênticos. Mais ou menos na mesma época, descrições físicas e cálculos matemáticos foram sendo desenvolvidos, tornando possível prever o comportamento das estruturas com base na previsão das ações atuantes nas mesmas. Esse período também ficou conhecido como a Era das Ferrovias e, juntamente com elas, vieram as necessidades de construção de pontes, estações, fábricas e armazéns. Todas essas obras contribuíram contundentemente à demanda por estruturas de grandes vãos. Assim, não tardaram a surgir as primeiras estruturas em forma de treliça e, finalmente, as estruturas espaciais (ALDCROFT e FREEMAN, 1983).

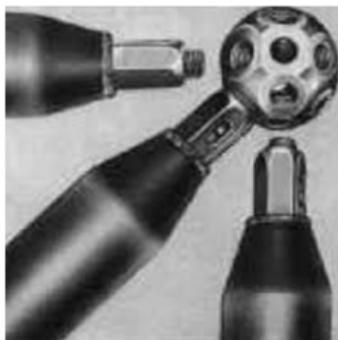
A primeira estrutura em ferro fundido produzida foi a ponte sobre o rio Severn, na cidade inglesa de Shropshire, no ano de 1779. Alguns detalhes dessa construção chamaram a atenção, como a presença de módulos de quadrados ou retângulos sólidos e a execução de alguns elementos circulares, todos fundidos em moldes de areia. Além disso, muitas ligações foram efetuadas como processos típicos de carpintaria, como a produção de entalhes idealizados com base na compressão dos elementos. Por questões de segurança a ponte foi fechada no ano de 1934, mas ainda hoje é utilizada como passarela (COSSONS e TRINDER, 2002).

No século XIX, a construção de duas estruturas buscou demonstrar as possibilidades construtivas abertas pela Revolução Industrial, ambas em caráter provisório. Uma delas, o Palácio de Cristal, de Joseph Paxton, recebeu a grande exposição de 1851 em Londres, destinada a demonstrar os avanços tecnológicos das nascentes nações industriais. Sinônimo de um arrojo estrutural, outros "Palácios de Cristal" foram construídos em cidades como Madri, Porto e Petrópolis, a fim de atestar a capacidade construtiva dessas sociedades. Já a outra estrutura, também provisória, mas que jamais chegaria a ser desmontada, foi a Torre Eiffel, construída entre 1897 e 1899 em Paris, em comemoração ao centenário da Revolução Francesa. Essa torre foi idealizada pelo engenheiro Gustave Eiffel, cujo objetivo central era propor uma torre com estrutura modular e espacial, a fim de atestar a estabilidade e durabilidade das estruturas em ferro fundido. Essas duas demonstrações das possibilidades da estrutura metálica estabeleceram novos desafios aos profissionais, que se viram motivados a desenvolver sistemas construtivos dentro do novo contexto industrial (MIGNOT, 1994).

No início do século XX, os primeiros experimentos que conduziram ao que se entende atualmente por armações ou malhas espaciais foram desenvolvidos por Alexander Graham Bell.

Em 1906, Bell foi co-fundador da Aerial Experiment Association, uma organização destinada a construir kits de torres pré-fabricadas. O inventor do telefone experimentou modelos estruturais de treliças compostas por módulos espaciais de octaedros e tetraedros visando a construção de torres de telefonia (MAGALHÃES e MALITE, 1998). Nesse momento é importante observar que a figura de Bell parece ser um elo entre os assuntos abordados na presente pesquisa, os sistemas de informação e estrutural. Conforme mostrado no capítulo anterior, como fundador dos AT&T Bell Labs, Bell iniciou toda a ciência produzida por Claude Shannon, Alan Turing e outros precursores de todos os equipamentos de comunicação existentes atualmente. Ao produzir suas estruturas espaciais, Bell provavelmente não imaginava que um século mais tarde elas seriam projetadas e produzidas utilizando a mesma tecnologia digital de fluxo de informação presente nos telefones.

Em meados do mesmo século, duas iniciativas marcaram a introdução comercial efetiva das estruturas espaciais na arquitetura. No início dos anos 1940, as primeiras malhas espaciais disponíveis comercialmente foram desenvolvidas pela empresa alemã Mero, fundada por Max Mengerlinghausen. Os sistemas produzidos foram compostos de elementos tubulares individuais conectados por nós esféricos conhecidos como ball shaped (*Figura 37a*). Já nos anos 1950, os ingleses Denings e Chard desenvolveram um sistema de coberturas espaciais baseadas em módulos piramidais pré-fabricados denominados space decks (*Figura 37b*). Esses módulos foram adotados como estrutura de coberturas planas e também de pisos, e se tornaram famosos por estruturar as barracas do exército inglês nesse período. Posteriormente, muitas coberturas utilizaram os conceitos dos space decks, que precederam as estruturas espaciais de banzos paralelos (TATA STEEL, 2014).



a. Conexão ball shaped do sistema alemão MERO. Fonte: <http://www.meroform.us>



b. Space deck, amplamente utilizado em estruturas de cobertura. Fonte: <http://www.tatasteelconstruction.com>

Figura 37: Sistemas idealizados para atender à expansão comercial das estruturas espaciais em meados do século XX.

O desenvolvimento dessas estruturas e componentes levou à fundação da Associação Internacional de Cascas e Estruturas Espaciais (IASS), por Eduardo Torroja, em 1959, com o objetivo de agregar os progressos da área e promover o intercâmbio de ideias. O desenvolvimento das pesquisas sobre o assunto ao redor do mundo produziu um vasto banco de dados catalogado pelo periódico da IASS, sobre os sistemas estruturais de malhas em casca, treliças espaciais, tensoestruturas e estruturas de fachada. No ano de 2009, muitas das principais pesquisas da área dos últimos 50 anos (MUNGAN e ABEL, 2009) foram republicadas no livro *Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures*.

Durante as décadas de 1950 e 1960, as estruturas espaciais proliferaram no repertório dos arquitetos, que exploraram estéticas com novos arranjos modulares. Nos Estados Unidos, Richard Buckminster Fuller se dedicou ao estudo de estruturas esféricas, desenvolvendo o sistema chamado Treliça Octet, cujo termo tem origem na geometria de octaedros e tetraedros formados pelas linhas que ligam os centros de esferas empilhadas continuamente (*Figura 38*). Algumas obras como o The Ford Rotunda Building, de 1953, em Michigan, ficaram famosas ao utilizar as noções das treliças octet para formar cúpulas geodésicas leves. Em 1959, o trabalho de Fuller foi exibido no Museu de Arte Moderna de Nova York, no qual se produziram vigas em balanço de aproximadamente 18 metros, a partir de módulos de 1200 milímetros de treliças octet (ZUNG, 2001).

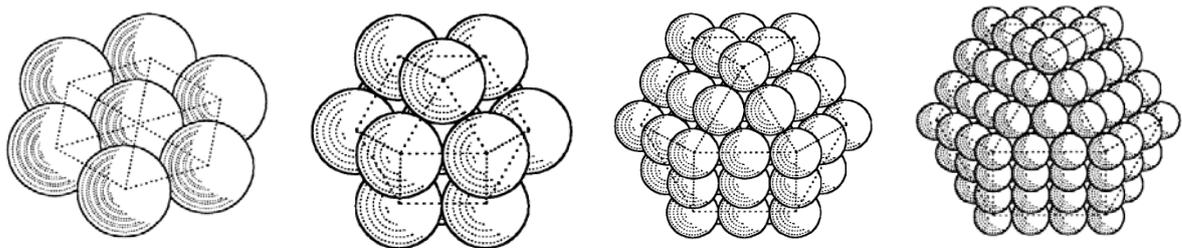


Figura 38: Princípio fundamental das Treliças Octet. Fonte: Chilton (2000).

O reconhecimento ao trabalho inovador de Fuller (1982) foi demonstrado na capa da revista Time, de 10 de janeiro de 1964 que retratou uma pintura do arquiteto feita por Boris Artzybasheff, na qual sua cabeça aparece com o padrão de uma cúpula geodésica (*Figura 39a*). O sucesso levou Fuller a receber o convite da Montreal Expo'67, para projetar uma cúpula geodésica em parceria com as empresas Sadao, Inc., Geometrics, Inc. e Simpson, Gumpertz and Heger, Inc. A cúpula consistiu em uma estrutura tubular com dupla camada, uma malha triangular externa e uma malha hexagonal interna (*Figura 39b*). Essas malhas multicamadas

foram as primeiras tentativas de demonstrar a viabilidade da construção de megaestruturas utilizando sistemas modulares com elementos reduzidos. Alguns números desse pavilhão ficaram famosos na época: 400 mil elementos, 100 mil nós de ligação e 2.5 milhões de parafusos, pesando um total de 7.500 toneladas. Ao completar 40 anos de desenvolvimento da cúpula geodésica, Fuller foi homenageado com um selo comemorativo do serviço postal norte-americano (*Figura 39c*).



a. Capa da revista *Time* de 1964. Fonte:
<http://www.time.com>



b. Cúpula geodésica da Expo'67. Fonte:
<http://www.arch.mcgill.ca>



c. Selo postal norte americano, reeditando a capa da *Time*, em 2004. Fonte:
<http://www.library.stanford.edu>

Figura 39: Sucesso de Buckminster Fuller na década de 1960.

Além de Fuller, outras iniciativas tiveram destaque nas décadas de 1950 e 1960. Em 1959, Konrad Wachsmann iniciou o desenvolvimento de um sistema de malhas espaciais para hangares da força aérea norte americana, cujas tipologias construtivas demandavam grande flexibilidade. Por meio de componentes desmontáveis e remontáveis em outras configurações, Wachsmann propôs um conector que combinava quatro elementos padronizados e permitia a ligação de até vinte tubos ao mesmo tempo (*Figura 40*). As articulações entre as peças do conector foram concebidas de modo que apenas um martelo era necessário para a montagem in loco, pois era preciso um apenas golpe para efetuar o travamento do conector com os elementos tubulares (WACHSMANN, 1961).

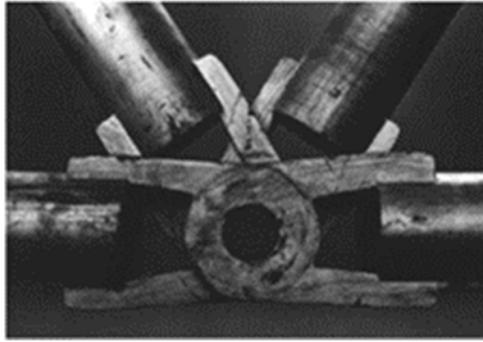


Figura 40: Sistema de conexão de Wachsman, Estados Unidos.

Fonte: <http://dprbcn.wordpress.com>

Na França, o arquiteto Stéphane du Château desenvolveu vários sistemas de estruturas espaciais. Primeiramente, em 1957, introduziu o Tridirectionelle S.D.C. que consistia em uma conexão que permitia técnicas mais simplificadas de soldagem com os tubos. Mais adiante, em 1960 e 1962, du Château também desenvolveu o Pyramitec, um sistema de malhas espaciais triangulares, quadradas e hexagonais utilizando módulos piramidais, e o Unibat, um sistema idêntico, mas utilizando ligações parafusadas (Fig. 3.5). Posteriormente, dois outros sistemas de du Château ganharam destaque, o Tridimac, de 1965, um sistema plano de treliças pré-fabricadas, e o Spherobat, de 1984, uma conexão que utiliza duas meias esferas ocas e parafusos, a fim de ligar os elementos tubulares. No ano de 1966, du Château participou da primeira conferência internacional sobre estruturas espaciais organizada por Zygmunt Stanislas Makowski, na qual publicou o artigo *A integração do pensamento técnico em design de arquitetura*¹, descrevendo métodos que conduziam a soluções inovadoras (MOTRO, 2013).



Figura 41: Unibat, um dos sistemas de conexão propostos por Du Château, na França.

Fonte: Mungan e Abel (2009).

No Canadá, o sistema Triodetic, formado por barras e articulações em alumínio, foi introduzido em 1960, por Fentiman Bros, na capital Ottawa. Foi inovador, principalmente pelo uso de perfis extrudados de alumínio e achatados nas extremidades. As conexões cilíndricas, também de

alumínio, continham ranhuras nas quais se inseriam as extremidades achatadas (*Figura 42*). O desenvolvimento desse sistema começou muito antes, em 1953, quando Bros produziu protótipos experimentais em madeira, também visando as estruturas desmontáveis para hangares aeronáuticos, nesse caso para a Real Força Aérea Canadense. Por fim, o Triodetic consistia em uma estrutura de 21 x 20 x 9.8 metros que poderia ser embalada em pequenas caixas de 1.5 x 1.5 x 3.7 metros. Na própria Expo'67, em Montreal, no Pavilhão da Holanda utilizou-se o sistema Triodetic na construção de uma estrutura espacial com área de 74.0 x 22.5 m e altura de 18.3 m, totalmente desmontável e sem a utilização de andaimes (TRIODETIC SPACE FRAMES, 2014).



*Figura 42: Sistema Triodetic proposto por Fentiman Bros, no Canadá.
Fonte: <http://www.triodetic.com>*

Ao mesmo tempo em que a produção de estruturas e conexões foi ganhando espaço nos repertórios construtivos, a difusão dos computadores e o desenvolvimento de aplicativos foram permitindo a modelagem e análise de estruturas de modo mais preciso e, conseqüentemente, com maior confiança. O avanço computacional das décadas de 60 e 70 foi, sem dúvida, um dos grandes propulsores da produção de estruturas de maior complexidade, uma vez que nessa época os elementos construtivos de aço e alumínio já possuíam praticamente as mesmas propriedades dos produtos atuais da indústria siderúrgica. Uma evidência inequívoca de que o desafio da complexidade estrutural permeava também a indústria da eletrônica foi o desenvolvimento de um aplicativo específico para a análise de malhas multicamada, utilizado no projeto da pirâmide Gyroton, também uma das novidades da Montreal Expo'67.

No início dos anos 1970, o grupo de arquitetos japoneses conhecido como Movimento Metabolista promoveu várias estruturas espaciais na Expo' 70, em Osaka. Dentre elas, uma das que mais chamou a atenção foi a grande treliça espacial que cobriu a praça principal do evento de 291.6 x 108.0 metros, apoiada em apenas 6 pilares a uma altura total de 30 metros do solo. Essa estrutura, projetada pelo arquiteto Kenzo Tange, demandou a utilização de tubos com 500

mm de diâmetro nos banzos e 350 mm nas diagonais, e as treliças foram conectadas aos pilares utilizando as conexões ball shaped. Além de se destacar pela dimensão de vãos e elementos, a estrutura de Tange chamou a atenção pelas estratégias de fabricação e montagem. Nas malhas espaciais é essencial que a geometria dos nós seja definida com base em sua posição, a fim de que na montagem não existam erros dimensionais cumulativos. Em geral, na década de 1970, os processos produtivos individualizados eram bastante onerosos. A alternativa de Tange foi propor um controle dimensional propositalmente menos rigoroso, a fim de permitir ajustes de comprimento nos elementos (LIN, 2010).

Além da estrutura de Tange, outras estruturas da exposição de Osaka foram projetados utilizando malhas espaciais, dentre elas a Torre Expo por Kiyonori Kikutake e o Toshiba & IHI Takara Beutilion por Kisho Kurokawa. Este último, em especial, promoveu um deslumbramento futurista, além de ser considerado uma expressão contundente das teorias metabolicistas, que propunham o design de cidades e edifícios em alusão as noções provenientes da Biologia. Devido ao sistema inovador de pré-fabricação e montagem, o Takara Beutilion demonstrou a possibilidade de promover uma complexidade estrutural a partir da flexibilidade dos elementos, que facilmente mudavam de configuração. Para isso, foram utilizados módulos tubulares formando cubos ocos medindo 3.3 metros de comprimento, com 6 braços salientes perpendiculares em cada face, compostos por quatro tubos agrupados (*Figura 43*). Os 298 m² do pavilhão foram montados e desmontados em apenas alguns dias, utilizando as novas tecnologias de montagem das estruturas, a partir de equipamentos de precisão eletrônicos. (KUROKAWA, 2002).



Figura 43: Toshiba & IHI Takara Beutilion por Kisho Kurokawa, flexibilidade de configurações estruturais. Fonte: <http://www.kisho.co.jp>

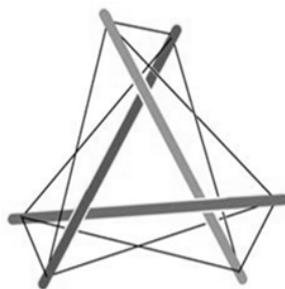
Em 1972, o arquiteto, engenheiro de estruturas e doutor em construções tensionadas Frei Otto, foi um dos projetistas da estrutura de cobertura do Estádio Olímpico de Munique, considerado um resultado de vários de seus experimentos nas décadas anteriores. Muito antes, Otto já havia

deixado sua marca com um elevado número de estruturas tensionadas e sistemas estruturais superleves. Em parceria com profissionais de diversas partes do mundo, Otto investigou limites para as estruturas, fundamentando-se mais nas formas naturais do que propriamente nas propriedades do aço e outros materiais sintéticos. No ano de 1964, Otto fundou o Instituto de Estruturas Leves (The Lightweight Structures) na Universidade de Stuttgart, onde promoveu avanços nos métodos de cálculo e fabricação, principalmente de estruturas de membranas e de construções infláveis. Nesse mesmo ano, Otto inseriu de modo vanguardista a modelagem computacional no projeto de estruturas de membranas. Ao mesmo tempo, realizou inúmeros experimentos explorando as superfícies mínimas por meio de protótipos físicos que utilizavam películas de bolhas de sabão (OTTO e RASCH, 1996).

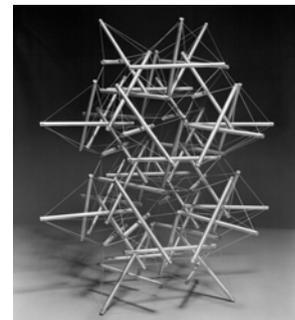
Os anos 1970 marcaram a carreira de Otto, pois nesse momento ele começou a fundir seus experimentos com técnicas de construção e logística computacional disponíveis. Em seu livro *Biology and Building*, de 1972, o autor examinou a possibilidade de estruturas com perfis leves baseando-se no estudo de crânios de aves. No ano seguinte, em outra publicação, Otto sugeriu o estudo de teias de aranha como bioinspiração para estruturas tensionadas, buscando limites ao esticar estruturas sintéticas. A revolução estrutural promovida por Otto continua a inspirar arquitetos renomados, como os ingleses Richard Rogers e Norman Foster, levando-o a receber a Medalha de Ouro Real concedida pelo Royal Institute of British Architects, um dos prêmios de arquitetura de maior prestígio do mundo (NERDINGER, 2005).

As associações entre estruturas e biologia também trouxeram do ramo da biomecânica a expressão tensegridade (*tensegrity*) que é uma propriedade presente em objetos cujos componentes utilizam a tração e a compressão de maneira combinada, proporcionando ao mesmo tempo estabilidade e resistência. Os animais, assim como outras estruturas biológicas, combinam tração e compressão utilizando ossos e tendões simultaneamente, conferindo resistência às solicitações diversas. Alguns modelos experimentais produzidos nos anos 1940 buscaram reproduzir esses sistemas utilizando barras e cabos. Contudo, uma controvérsia sobre a autoria dos primeiros modelos desses sistemas persiste até os dias atuais. Três pedidos de patentes, enunciados aqui em ordem alfabética, de David Georges Emmerich, Kenneth Snelson e Richard Buckminster Fuller, deram amplo testemunho de autoria, descrevendo estruturas idênticas. Todas elas apresentando a tensegridade mínima, com módulos de três barras e nove cabos (JÁUREGUI, 2009).

Além das controvérsias, a dificuldade em se definir o que são os sistemas estruturais com tensegridade é bem conhecida. No pedido de patente de Fuller, a expressão "ilhas de compressão dentro de um oceano de tração" se tornou conhecida, embora, na essência, outros sistemas estariam dentro dessa definição. Essa e outras definições são discutidas por Motro (2003) que traça uma linha de raciocínio entre os argumentos de Emmerich, Snelson e Fuller. Com base no denominador comum desses argumentos, os sistemas de tensegridade podem ser definidos como reticulados espaciais de barras e cabos em um estado de auto stress. As barras são envolvidas por cabos tracionados, que não apresentam rigidez à compressão, mas comprimem as barras. Forma-se assim um conjunto contínuo de cabos e descontínuo de barras. Cada nó recebe um, e apenas um, elemento comprimido (*Figura 44*).



a. *Condição mínima de estabilidade: três barras e 9 cabos.*



b. *Um dos modelos de Kenneth Snelson.*

Figura 44: Sistemas tensegrity. Fonte: Motro (2003).

Juntamente com os avanços nas esferas produtivas, a prática projetual de estruturas espaciais foram impactadas pelas mudanças nas relações entre ferramentas e processos de fabricação. O Controle Numérico Computacional (CNC), desenvolvido no MIT na década de 1950¹⁸ (REINTJES, 1991), *Numerical Control: Making a New Technology*, Oxford University Press, permitiu a vinculação direta entre o projeto e a produção por meio de computadores e equipamentos de usinagem. Da associação do CNC com as plataformas digitais de projeto nasceu o Computer-Aided Design/Manufacturing (CAM/CAM) e, com isso, as plataformas digitais de projeto e fabricação atingiram um patamar tecnológico capaz de aliar complexidade e precisão. A partir daí a evolução dos processos de comunicação entre homem e máquina impactaram não apenas os métodos produtivos, mas também o pensamento projetual.

¹⁸ De acordo com Reitjes (1991), o padrão G-Code, cuja origem remonta ao MIT por volta de 1958, pode ser entendido como um marco inicial do controle numérico computacional, embora outros desenvolvimentos anteriores tenham contribuído a sua implementação.

Mais tarde que nas áreas da mecânica e eletrônica, a arquitetura começou a incorporar efetivamente técnicas de fabricação digital nos processos de produção e projeto na última década do século XX. Contudo, essas aplicações promoveram uma mudança crítica na habilidade de traduzir intencionalidades. Convencionalmente, os documentos bidimensionais (plantas, seções, elevações e detalhes) continuam a compreender o escopo das representações gráficas. Contudo, o Design Computacional tem se firmado como uma ciência exploratória muito mais dedicada à exploração formal de soluções por meio da manipulação de modelos computacionais tridimensionais, do que suas projeções ortogonais.

Desde a publicação da obra *Performative Architecture: Beyond Instrumentality* (KOLAREVIC e MALKAWI, 2005), os arquitetos têm se preocupado cada vez mais em utilizar o bom desempenho como um princípio norteador do projeto. Essa conduta sempre esteve presente na obra dos principais arquitetos da história, mas, segundo esses autores, a disponibilidade atual de programas de simulação facilitou enormemente a incorporação dos resultados das análises de desempenho, em especial o ambiental e o estrutural, nas etapas iniciais de projeto. No entanto, a retroalimentação dos resultados dessas análises nem sempre é feita de maneira automatizada, pois isso exige o desenvolvimento de programas com capacidades generativas, o que implica necessariamente na adoção de condutas projetuais específicas. Em outras palavras, em um cenário ideal, o projetista deveria ser capaz de programar suas próprias ferramentas, de modo a obter a automatização da incorporação do resultado das análises em seu processo de projeto.

Diversos conceitos amplamente aceitos no âmbito dos sistemas estruturais foram propostos pelo grupo de pesquisa *Structural Morphology*, fundado em 1991, que se dedica a investigar as relações entre geometria e estruturas. Diversas produções e experiências desse grupo foram organizadas no livro *An Anthology of Structural Morphology*, publicado no ano de 2009. Essa publicação teve como objetivo posicionar questões sobre a morfologia estrutural comumente abordadas no contexto da concepção dos sistemas construtivos e as definições de forma, estrutura e sistema estão sempre entre os conceitos seminais.

Sem pretensões de aprofundamento nos conceitos seminais, qualquer tentativa de definir "estrutura" conduz imediatamente à consideração simultânea do que é "forma". Os dois conceitos estão intimamente relacionados, de modo que ao se tentar definir um, quase sempre se faz referência ao outro. Essa referência recíproca aparece, por exemplo, no dicionário francês Larousse, no qual estrutura é "[...] um conjunto orgânico de formas que é concebida diretamente

antes de cada detalhe isolado." e forma "[...] é a percepção de um conjunto de estruturas organizadas, no qual, em todos os domínios, existe uma influência mútua entre as partes." As definições propostas para esses conceitos deixam clara a existência dialética entre conjunto e partes, e as duas se relacionam de maneira mais específica na noção de sistema (MOTRO, 2009).

Na visão de Delattre (1971) um sistema estrutural pode ser definido de maneira bastante generalizada como um conjunto de elementos que interagem entre si e possivelmente com o ambiente externo. O comportamento desses elementos está relacionado com o papel que ele desempenha dentro do sistema e isso define, portanto, suas propriedades. A comparação entre vários elementos envolve a comparação entre suas propriedades, permitindo, assim, a definição de categorias de referência. Uma vez que as características dos elementos são fixadas, é possível agrupá-los em categorias.

Dentre as inúmeras possibilidades de categorização, as relações geométricas estão entre as que permitem evidenciar muitas características sobre as estruturas. Desse modo, podem-se agrupar os componentes básicos das estruturas em: (1) blocos, com três dimensões de mesma grandeza; (2) barras, com duas dimensões de mesma grandeza e uma terceira de ordem maior; e (3) placas, com duas dimensões de mesma grandeza e uma terceira de ordem menor. A associação desses elementos visando a transferência de cargas até o solo determina também a transmissão de esforços ao longo da estrutura. Uma estrutura com muitas possibilidades de transmissão tende a ter elementos mais esbeltos, caso típico das treliças espaciais e multiplanares. Já as estruturas com poucos elementos sofrem um acúmulo de forças em cada um deles, requisitando elementos robustos, como é o caso da estrutura do edifício do MASP, em São Paulo (REBELLO, 2007).

Os conceitos estruturais que norteiam o design de estruturas planas, compostas comumente por vigas, treliças planas e pórticos, são distintos dos conceitos norteadores das estruturas espaciais. As possibilidades de uma estrutura pensada em três dimensões se tornam particularmente mais evidentes quando existem cargas pontuais elevadas ou cargas móveis. Naturalmente, todas as estruturas são tridimensionais por excelência, no sentido de que todas elas possuem comprimento, profundidade e espessura. No entanto, vigas e treliças planas são predominantemente bidimensionais em sua ação estrutural, já que efetivamente visam resistir às cargas aplicadas em uma única direção entre seus suportes, geralmente no plano vertical. Mesmo para essas estruturas, é imprudente negligenciar os aspectos da estabilidade nas três dimensões (MAKOWSKI, 1968).

Nas estruturas de ação predominantemente bidimensional, a estabilidade na terceira dimensão é garantida, em várias situações, pelo aumento da profundidade dos elementos estruturais. Nas vigas e treliças planas submetidas a excessivas solicitações de flexão, por exemplo, a tendência à curvatura lateral é neutralizada pelo adequado dimensionamento das profundidades dos elementos, ou pela inserção de elementos adicionais. Nas estruturas planas, as vigas e treliças devem ser concebidas individualmente, a fim de resistirem às solicitações aplicadas, de qualquer magnitude, em qualquer ponto. Nos sistemas de múltiplas vigas em paralelo é possível ocorrer a deformação do sistema a partir de elementos individuais (*Figura 45a*), ou deformação conjunta do sistema (*Figura 45b*). Nesta última, cada membro contribui com a resistência global do sistema, o que confere uma tridimensionalidade à estrutura, na qual as cargas são desferidas aos elementos adjacentes (CHILTON, 2000).

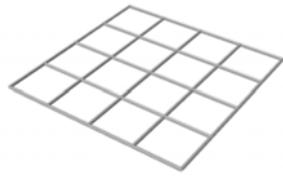


a. Deformação em um sistema de treliças individuais.

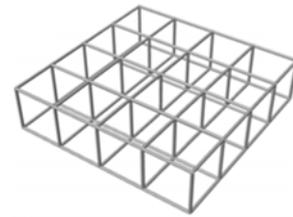
b. Deformação conjunta em um sistema de treliças com distribuição do carregamento.

Figura 45: Associações de elementos estruturais planos. Fonte: Chilton (2000).

A associação de elementos em duas direções (bidirecionais), por exemplo, subentende a produção de um sistema de compartilhamento de cargas, geralmente como uma malha plana regular, de vigas ou treliças dispostas de maneira ortogonal em um plano horizontal. Nessa situação, nos elementos submetidos a elevadas solicitações existe um declínio gradativo de esforços, das regiões mais próximas para as regiões mais distantes. Um exemplo comum de sistemas desse tipo são as lajes em concreto, armadas com uma malha de barras em camada única. A extensão de seu uso a vãos com mais de 10 metros se torna onerosa, podendo então ser substituídas por outras configurações geométricas, como as estruturas prismáticas, nas quais dois planos horizontais paralelos conectados por elementos verticais ou inclinados formam uma rede entre as duas malhas planas horizontais (*Figura 46*).



a. Malha de camada única.



b. Malha de camada dupla.

Figura 46: Exemplos de estruturas bidirecionais. Fonte: Ilustração nossa.

Naturalmente, outras configurações geométricas além das malhas horizontais são possíveis. A rigor, ao longo de qualquer superfície moldável pode-se estabelecer uma malha, embora nem sempre esse procedimento conduza a soluções viáveis e eficientes. Essas superfícies normalmente são obtidas por linhas axiais, livremente alteradas por curva de controle, como as B-Splines³. Um exemplo desse tipo de raciocínio são as estruturas de malha diagonal (diagonal grid ou diagrid), nas quais se definem malhas triangulares, com vigas de apoio e diagonais, segundo uma dada superfície. Em alguns edifícios, sistemas desse tipo reduziram e até eliminaram a necessidade de pilares, proporcionando uma distribuição de esforços mais homogênea ao longo da estrutura. Um exemplo dessa solução é a Torre Hearst, proposta pelo arquiteto Norman Foster (Figura 47).



Figura 47: The Hearst Tower, Nova Iorque, de 2003. Fonte: <http://www.nyc-architecture.com>

Dentre outros modos de utilização de estruturas de malha diagonal, estão as estruturas de malha em casca (*gridshells*), nas quais a rigidez é obtida por meio da curvatura da forma. No design estrutural com técnicas de modelagem paramétrica, as malhas em cascas estão entre as soluções mais exploradas. Uma *gridshell* pode ser definida como uma estrutura composta de elementos lineares individuais em uma malha de altura reduzida em comparação com as outras duas dimensões. No repertório do arquiteto japonês Shigeru Ban, por exemplo, são encontradas várias propostas de malhas em cascas, algumas delas definidas a partir de superfícies não-

desenvolvíveis, como a estrutura do pavilhão japonês para a Expo'Hannover em 2000 (*Figura 48*), mencionado no início deste capítulo, em que uma *gridshell* foi produzida a partir de tubos em papelão (MCQUAID, 2003).



Figura 48: Pavilhão japonês para a Expo'Hannover, em 2000.
 Fonte: <http://www.japantimes.co.jp>

Do ponto de vista estrutural, as malhas superficiais (*diagrids* ou *gridshells*) apresentam semelhança com as estruturas espaciais, e alguns autores também as incluem na definição de estrutura espacial. Em qualquer dos enquadramentos, as estruturas de malha de camada única e dupla podem ser descritas como "irmãs" pelas seguintes semelhanças: 1) nos processos de projeto, buscam-se formas em que aplicação de cargas gerem esforços axiais (tensão ou compressão) com pouca ou nenhuma curvatura; 2) as deformações geralmente são reduzidas, devido à rigidez inerente ao sistema; 3) a associação de elementos normalmente conduz a soluções eficientes, otimizando o uso de materiais. Devido a essas semelhanças, nas análises preliminares de estruturas espaciais podem ser estabelecidas analogias com o comportamento das estruturas de malha, fragmentando-se a dupla camada em cascas ou placas equivalentes (RAMASWAMY, EEKHOUT e SURESH, 2002).

Afora as divisões e características, a noção de estrutura espacial é de difícil delineamento, principalmente pelas inúmeras particularidades e por apresentar inovações constantes. Muito embora alguns casos particulares escapem às definições, no ano de 1984, a IASS publicou um relatório que definiu o termo armação espacial (*space frame*) como "[...] um sistema estrutural montado de elementos lineares, cujas cargas são transferidas de modo tridimensional."¹⁹ Essa definição surtiu como um adendo à definição proposta pela ASCE, em 1976, que denominava as estruturas espaciais de estruturas de malha, entendidas como "um sistema estrutural na forma

¹⁹ A space frame is a structural system, assembled of linear elements so arranged that the loads are transferred in a three-dimensional manner. In some cases, the constituent elements may be two-dimensional. Macroscopically, a space frame often takes the form of a flat or curved surfaces.

de uma rede de elementos", em oposição a uma superfície contínua, "[...] caracterizado pelo sistema estrutural reticulado, no qual seu mecanismo de transporte de carga é tridimensional por excelência."²⁰. Nas duas definições não se faz distinção entre as estruturas de camada única ou dupla (CHEN e LUI, 2005).

Na mesma linha, Lan (2005) define o termo armação espacial como um sistema estrutural obtido a partir de elementos lineares dispostos de maneira em que as forças não sejam transferidas de modo unidirecional. Macroscopicamente uma armação espacial geralmente tem a forma de uma superfície plana ou curva. O autor argumenta ainda que a armação espacial pode ser formada por qualquer plano ou superfície curva e a mais antiga forma de estrutura espacial é da malha de camada única. A principal característica da construção da malha é a propagação multidirecional de esforços, em oposição à transferência linear dos sistemas estruturais convencionais. Uma vez que tal transferência de esforços produzem efeitos de flexão para vãos maiores, a rigidez do sistema pode ser naturalmente aumentada alterando a configuração de camada única para um sistema de dupla camada.

Essa definição é de certo modo completada por Chilton (2000), que chama a atenção para a trivialidade do uso do termo armação espacial nos Estados Unidos e propõe uma divisão entre armações espaciais (*space frames*) e malhas espaciais (*space grids*). As armações espaciais geralmente são estruturas não trianguladas e possuem algumas (ou todas) as conexões integralmente rígidas, a fim de resistir aos esforços por uma combinação de flexão, cisalhamento e forças axiais em todos os elementos, mesmo quando as solicitações são aplicadas apenas nas articulações. Geralmente, as armações espaciais são pré-fabricadas, soldadas ou aparafusadas *in loco*. As malhas espaciais se caracterizam pela divisão de uma superfície com barras e articulações, cujos esforços são aplicados diretamente nestas últimas, visando transmitir, predominantemente, forças axiais. À fusão desse conceito com a ação estrutural obtida pela triangulação completa denomina-se malha espacial *treliçada*, ou simplesmente treliça espacial.

Enquanto o termo *space frame* é o de maior trivialidade nos Estados Unidos, pode-se dizer que, no Brasil, as expressões "treliça" ou "estrutura *treliçada*" são comumente associadas a qualquer enlace de elementos, arranjados de maneira triangulada ou não. No entanto, a partir das definições de Lan e Chilton, faz sentido entender o termo treliça espacial como um caso

²⁰ A structural system in the form of a network of elements [...] another characteristic of lattice structural system is that their load-carrying mechanism is three dimensional in nature.

particular das armações espaciais, em que a associação de elementos é necessariamente triangulada. As armações espaciais são casos mais amplos, inclusive do ponto de vista linguístico, já que qualquer configuração de barras pode ser chamada de armação. Por outro lado, a noção de treliça é, de certo modo, mais restritiva pois se refere exclusivamente aos módulos triangulares. A triangulação é de fato muito utilizada por ser o triângulo a única forma indeformável, o que normalmente conduz a um conjunto estrutural de elevada resistência. Embora, convencionalmente, as malhas de vários formatos sejam chamadas de treliças, a rigor Engel (2006) as define como:

“[...] sistemas de estrutura de elementos sólidos e em linha reta (barras, hastes), nas quais a redistribuição das forças faz-se efetiva por meio da decomposição vetorial, isto é, da decomposição multidirecional de forças. Os componentes do sistema são sustentados em parte por compressão, em parte por tração. As características típicas deste tipo de estrutura são a triangulação e os pontos de conexão.” (ENGEL, 2006, p. 135).

Nas treliças planas, cujo conjunto de barras são coplanares, a característica principal é a montagem triangular de peças: triangulação. Por meio dos efeitos de tração e compressão, os quadros triangulares formam uma composição estável e completa em si mesma que, se apropriadamente dimensionada, é capaz de receber cargas assimétricas e variáveis, transferindo-as aos extremos. As barras compressíveis e tracionáveis, dispostas segundo um sistema de nós articulados, constituem mecanismos que podem mudar as direções das forças e transmitir esforços a longas distâncias sem apoios intermediários. A situação ideal do ponto de vista estrutural é a produção de um sistema reticulado indeformável, cujas barras possuem todas as suas extremidades rotuladas e cujas cargas estão aplicadas nessas rótulas. Nessas circunstâncias, as treliças podem ser divididas em (*Figura 49*):

- Banzo (ou corda): barras que limitam superiormente ou inferiormente;
- Montantes: barras verticais;
- Painel: trecho compreendido entre dois alinhamentos consecutivos de montantes;
- Diagonal: barra de eixo coincidente com a diagonal de um painel;
- Nó: ponto de encontro e junção das extremidades das barras.

Esses sistemas estruturais podem ser classificados como de vetor ativo, compostos por elementos curtos, sólidos e lineares. Devido a sua pequena seção em comparação com o seu comprimento, podem transmitir forças apenas na direção de seu comprimento, isto é, esforços normais, de tração e/ou compressão. As barras comprimidas e/ou tracionadas, montadas de

modo triangular, formam uma composição estável em si mesma que, adequadamente dimensionada, é capaz de receber ações assimétricas e variáveis transferindo-as aos suportes. Desse modo, as ações externas são divididas e redirecionadas por duas ou mais peças, e são mantidas em equilíbrio por meio de reações apropriadas (vetores ativos). Além disso, devido ao elevado grau de *hiperestaticidade*, um dano em algum elemento não implica, necessariamente, no colapso de toda estrutura (ENGEL, 2006).

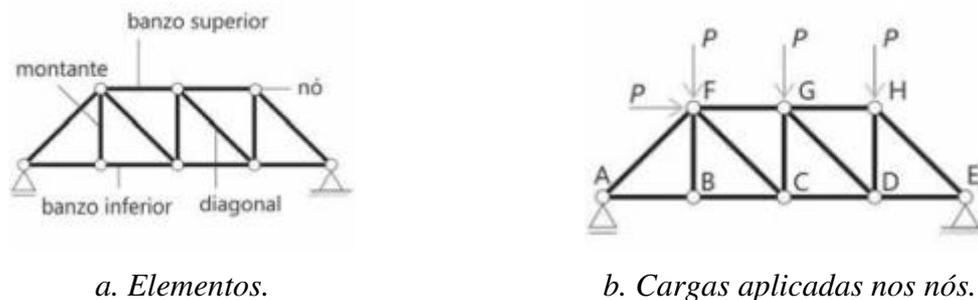


Figura 49: Características das treliças planas. Fonte: Ilustração nossa.

As treliças espaciais são versões dessas estruturas em dupla camada, cujas malhas são dispostas segundo dois planos paralelos entre si, interconectados por montantes ou diagonais. A produção dessas estruturas em perfis metálicos normalmente compreende uma racionalização industrial, em que se obtém a forma estrutural a partir da combinação de módulos pré-fabricados de tetraedros, octaedros ou pirâmides de bases triangular, quadrada ou hexagonal. Por conta disso, esses sistemas estruturais são geralmente classificados como modulares, embora a disposição das malhas paralelas possa ser idêntica ou diferente. Na *Figura 50* mostram-se os tipos mais comuns de treliças espaciais. As linhas mais espessas representam as malhas superiores, as mais finas, as inferiores, e as diagonais são representadas pelas linhas tracejadas. Os três primeiros tipos (*Figura 50a*) são conhecidos como bidirecionais, por conta das malhas retangulares, enquanto os três últimos (*Figura 50b*) são denominados *tridirecionais* por conta das malhas triangulares. Os dois últimos padrões são utilizados principalmente no Japão, Alemanha, Itália, França e Inglaterra (NARAYANAN, 2006).

Os exemplos mostrados são utilizados com frequência em projetos de coberturas e a repetição modular é, sem dúvida, um fator bastante evidente. Em arquitetura, o termo módulo é uma unidade arbitrária adotada para regular as dimensões, as proporções, ou a construção das partes em um edifício. Esse termo vem do latim *modulus*, cuja tradução literal significa pequena medida. Tem sido utilizado no projeto e construção de edificações desde a era vitruviana, no século I (D.C.) e corresponde a uma unidade básica de medida da qual muitas (ou todas) as

dimensões da edificação são derivadas. No templos clássicos greco-romanos, o módulo correspondia ao diâmetro da coluna e nos templos chineses ele era a extensão da tesoura. Na arquitetura clássica, o módulo não era uma medida absoluta, pois variava de acordo com o tamanho de cada edificação. O módulo ou a modulação pretendia controlar a proporção estética visual e não era subordinado a nenhum outro material ou instrumento humano de medição.

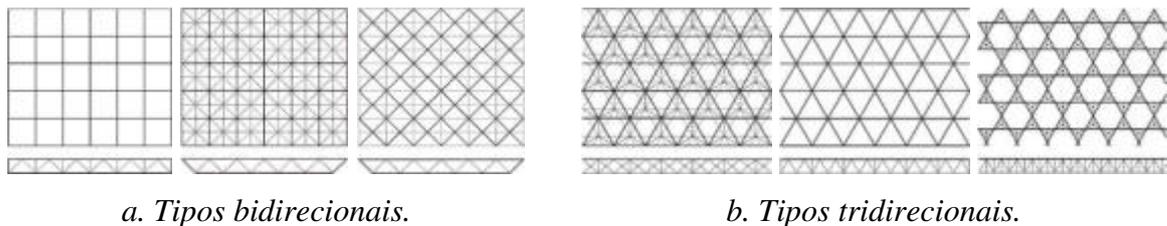


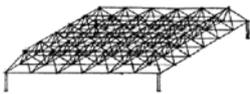
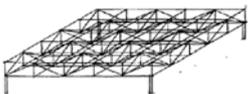
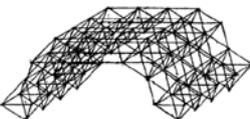
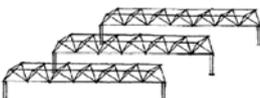
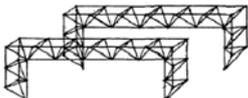
Figura 50: Tipos mais tradicionais de treliças espaciais. Fonte: Narayanan (2006).

O *design* modular ou modularidade é uma abordagem que subdivide o todo em partes a serem produzidas de maneira independente, visando associá-las, a fim de constituir um conjunto contínuo estruturalmente coerente. Além da redução dos custos relacionada à repetição, a modulação oferece outros benefícios, como a flexibilidade de escalas, em que o aumento ou diminuição de uma estrutura se dá pela adição ou exclusão de módulos. A forte limitação para o exercício da modularidade, e isso também é função de sua extensão, é que normalmente conduzem a sistemas não otimizados para o desempenho. Um contexto mais interessante tem sido estabelecer relações específicas entre elementos pré-determinados, de modo que a mudança de uma variável automaticamente resultará em uma "reação em cadeia" entre os elementos que foram programados para reagir de uma maneira específica (DEAMER e BERNSTEIN, 2010).

Makowski (1987) catalogou extensivos estudos sobre a distribuição de esforços em estruturas espaciais modulares compostas por malhas retangulares, diagonais e triangulares, nas quais várias configurações de estruturas de dupla camada foram comparadas a partir de um número de parâmetros como carregamento, vãos, condições de apoio, etc. Esses estudos abriram caminho para a otimização topológica, nas quais as decisões projetuais poderiam ser orientada primeiramente por uma escolha topológica e, conseqüentemente, pela abertura da malha, pela seleção da profundidade estrutural e pela determinação das condições de suporte, a fim de minimizar as solicitações. Desse modo, configurações mais esparsas possuem menos nós e menos diagonais e podem resultar em estruturas economicamente mais viáveis.

Na classificação proposta por Engel (2006), os sistemas estruturais de treliças espaciais são discriminados como planos, dobrados, curvos e lineares ().

Quadro 3: Tipos de treliças espaciais. Fonte: Adaptado de Engel (2006).

Classificação	Trelças espaciais		
Sistemas planos			
	Semi octaédrica	Semi tetraédrica	Prismática
Sistemas curvos			
	Dobra paralela		
Sistemas dobrados			
	Individualmente curvada	Duplamente curvada	Esférica
Sistemas lineares			
	Viga espacial treliçada	Pórtico espacial treliçado	Arco espacial treliçado

Fonte: Adaptado de (Engel, 2006).

Desde a Era Industrial até a atual Era da Informação, o design estrutural não tem se concentrado somente nos aspectos projetuais do planejamento de estruturas, mas também em seus aspectos produtivos e construtivos.

As consequências desses processos para o design de estruturas foi o impacto direto nas noções de modulação predominantes na lógica industrial. O desenvolvimento de formas não padronizadas tem sido orientado por explorações formais por meio da implementação de noções matemáticas em ambientes computacionais paramétricos, seguido de técnicas de otimização estrutural. Um dos exemplos marcantes de inserção dessas técnicas no design estrutural foi desenvolvido pelo escritório Nicholas Grimshaw and Partners, no ano de 1993, que explorou as potencialidades da modelagem paramétrica nos reticulados espaciais no projeto da Estação

Internacional de Waterloo, no qual foram propostos 36 arcos articulados com a mesma configuração, porém com dimensões diferentes (*Figura 51*).

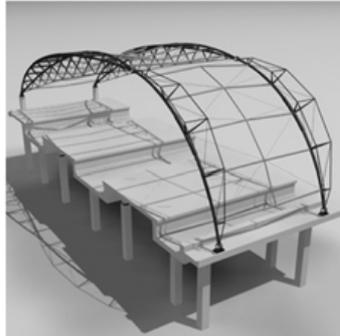


Figura 51: Arcos espaciais propostos no projeto da Estação de Waterloo.

Fonte: <http://www.turbosquid.com>

Tanto no projeto quanto na produção dessas estruturas têm sido utilizadas técnicas de fabricação e prototipagem que incluem o controle paramétrico de curvas e superfícies, fatiamento de sólidos, a triangulação de barras e a articulação de conexões e dobras. A estratégia mais adequada depende do que está sendo proposto. Uma sequência de seções planas, paralelas entre si, pode ser obtida facilmente pelo fatiamento. A conversão de uma dupla curvatura em uma superfície regrada é frequentemente produzida por qualquer triangulação obtida a partir da interpolação linear entre duas curvas. As superfícies regradas, por sua vez podem ser desdobradas em tiras planas e assentadas em uma folha, para serem cortadas posteriormente por equipamentos CNC.

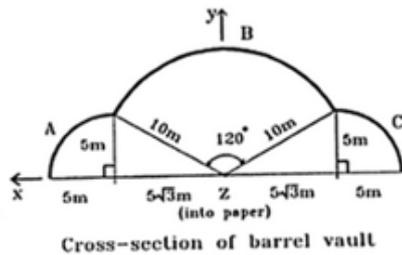
No paradigma da arquitetura contemporânea que envolve a concepção de estruturas complexas digitalmente mediada, práticas anteriormente utilizadas acabam se tornando irracionais. Modelos de projeto capazes de se transformar continuamente têm substituído os métodos estáticos dos processos convencionais. As representações tradicionais têm sido abandonadas em favor das formas computacionalmente geradas, em que geometrias esféricas e cônicas são produzidas com a mesma facilidade que formas planas. Do mesmo modo, malhas rigidamente regulares, repetições e simetrias perdem a preponderância nos processos de projeto, no momento em que a personalização em massa oferece uma alternativa à modularidade convencional. Pottman et al. (2007) propuseram métodos alternativos à construção de geometrias em ambientes CAD, além do aprofundamento da discussão sobre a necessidade de atualização do ensino da geometria para arquitetos e engenheiros civis.

O contexto atual desse novo paradigma é traçado no item seguinte, no qual apresentam-se implementações no campo investigativo do design estrutural. Por meio de recentes pesquisas de considerada relevância científica, buscou-se delinear um panorama que demonstra o estado da arte atual dos métodos de projeto e como sua aplicação direcionada ao design de estruturas tem possibilitado a obtenção de resultados inovadores.

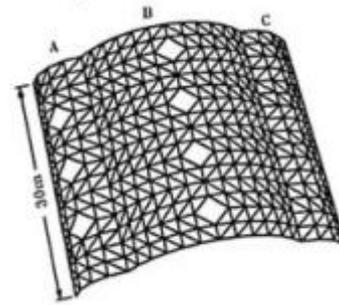
3.2 DESIGN DE ESTRUTURAS ESPACIAIS COMPLEXAS: ESTADO DA ARTE

Na apropriação do conceito de gerações pelo Design Computacional, procura-se encontrar soluções para um problema de projeto, em detrimento de uma única solução em particular. De algum modo, essas soluções "sobrevivem" a um processo que as classifica como adequadas ou satisfatórias. Esse processo, descrito como sistema generativo de projeto, foi definido por Fischer e Herr (2001) como uma estratégia projetual que difere de outras, principalmente porque, durante o processo, o projetista elabora métodos que permitem a produção de objetos em detrimento da projeção direta de um único objeto. Embora atualmente esses sistemas estejam associados à modelagem computacional, é um engano pensar que são exclusividade dos computadores. Mitchell (1975) desmistificou esse mal-entendido ao identificar que, desde a obra de Aristóteles, essas noções vêm sendo desenvolvidas. No entanto, pode-se dizer que os computadores se tornaram ferramentas apropriadas a esses sistemas, por diversas razões, inclusive por permitirem a rápida avaliação de uma elevada quantidade de soluções.

No design estrutural, os sistemas generativos vêm sendo explorados há algum tempo, orientados, inicialmente, pela vinculação de geometrias a funções algébricas. No início da década de 1990, por exemplo, Nooshin e Hadker (1993) propuseram o termo processamento de configurações, significando a geração e manipulação de modelos gráficos a partir de representações numéricas. Nesse sistema generativo, propôs-se uma abóbada de berço de camada única, composta de três seções conectadas (geratrizes), denotadas por A, B e C. Utilizando essa configuração, o sistema foi capaz de definir a quantidade e dimensão de barras e nós de maneira automatizada, baseando-se apenas em suas curvas geratrizes que, nesse caso, representam parâmetros para as novas abóbadas. Esses parâmetros puderam ser trabalhados separadamente, pois foram estabelecidas funções para eliminação de sobreposições e inserção de elementos adicionais (*Figura 52*).



a. Tipos bidirecionais.



b. Tipos tridirecionais.

Figura 52: Design estrutural generativo, visando a geração automatizada de abóbadas de berço a partir de três seções distintas. Fonte: Nooshin e Hadker (1993).

A partir dos anos 2000, algumas abordagens generativas constituíram-se como estratégias para a obtenção de estruturas de elevada complexidade, utilizando para isso as noções de modelagem paramétrica. Fischer (2005) identificou características *top-down* e *bottom-up* nessas estratégias, concluindo que a simplificação de elementos é uma tendência comum a ambas. Essa simplificação tem sido traduzida, em grande parte, pela simulação de uma irregularidade, na qual uma estrutura regular tem a aparência de uma estrutura irregular. Sob essa perspectiva, busca-se a manutenção de aspectos como repetição e continuidade.

Dentre as estratégias *bottom-up*, o autor destacou a geração de malhas espaciais, aparentemente irregulares, por meio dos Diagramas de Voronoi²¹. Nesses casos, um conjunto de pontos é disposto aleatoriamente em um plano (ou volume), nos quais os mesmos são circunscritos por uma rede de bordas (faces) que maximizam a área ao redor de cada ponto individualmente, compondo uma hierarquia de pontos, retas e volume (). Já a aparência irregular nas abordagens *top-down* pode ser obtida pela divisão do espaço métrico em subpartições auto similares, como a fragmentação de um dodecaedro em células piramidais. As faces de um dodecaedro rômbo, por exemplo, correspondem às faces de 12 pirâmides rômbricas cujos vértices se encontram no centro geométrico do dodecaedro. Por sua vez, cada pirâmide também pode ser dividida em 8 pirâmides menores, podendo ser combinadas segundo diferentes ângulos de rotação, nesse processo de decomposição hierárquica (Figura 53).

Mesmo distintas, essas duas estratégias buscam combinar dois fatores: a complexidade de formas e a repetição de elementos. Em um estudo posterior, Fischer (2007) buscou comparar essas estratégias, segundo alguns aspectos comuns à pré-fabricação de estruturas. Utilizando

²¹ Diagrama de Voronoi é um tipo de decomposição do espaço métrico determinada pela distância entre uma família de objetos (pontos), efetuada pela conexão das mediatrizes dos segmentos de reta que representam a menor distância entre os mesmos.

como critério a uniformidade dimensional, o autor impôs uma restrição no comprimento das linhas (barras), de maneira a explorar três condições dentro de um processo generativo de formas: de pré-racionalização, com a restrição previamente imposta ao processo; co-racionalização, com a restrição imposta concomitantemente ao processo; e pós-racionalização, com a restrição imposta posteriormente ao processo. Nas conclusões do autor, em qualquer dos três processos, simples mudanças geométricas representaram grandes consequências nas estruturas globais, mas, levando em conta os aspectos da pré-fabricação, as propostas de pré-racionalização se mostraram mais satisfatórias.

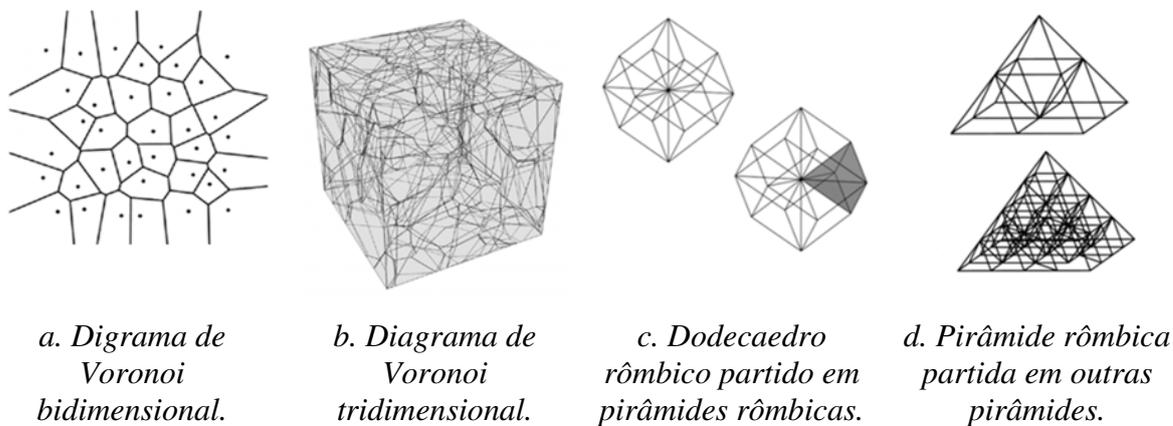


Figura 53: Estratégias bottom-up e top-down para a obtenção de estruturas complexas aparentemente irregulares. Fonte: Fischer (2005).

No exploração pré-racionalizada, buscou-se gerar configurações geométricas planas e espaciais restringindo o comprimento dos lados ou arestas (2D e 3D) a uma dimensão única. No plano, foi possível gerar configurações periódicas combinando três polígonos convexos diferentes utilizando sempre o mesmo segmento de reta. Já na condição tridimensional, alguns poliedros (icosaedro truncado, octaedro truncado e prisma pentagonal) também foram gerados da mesma maneira. Explorando um pouco mais o conceito, como a junção, por exemplo, de dois octaedros com um icosaedro, observou-se que pequenos desencontros entre dois vértices poderiam ser corrigidos por pequenos ajustes, como a rotação e a translação de alguns vértices, o que resultou apenas em pequenos acréscimos na dimensão das barras, cerca de 4% do comprimento inicial.

A ideia dos pequenos ajustes conduziu a conclusões sobre os benefícios da combinação entre a automatização proporcionada pelos sistemas generativos e a manipulação manual no ambiente do design exploratório. Em outro modelo computacional Fischer, Burry e Frazer (2005) propuseram explorar essa noção definindo a priori um poliedro com alguns vértices fixos enquanto outros possuíam liberdade de movimento. Baseando-se em noções de triangulação,

os autores identificaram gamas de movimentos possíveis, de maneira a resguardar algumas restrições ligadas a conceitos básicos sobre a teoria das estruturas.

Nas definições de movimento, as faces do poliedro foram trianguladas, permitindo o deslocamento individual dos vértices móveis sem afetar a posição dos vértices fixos. Os alcances desses movimentos foram definidos, de modo a evitar inversões do sólido, isto é, mantendo-o sempre como um poliedro convexo. Na *Figura 54a*, mostra-se uma das propostas para essa restrição, limitando os movimentos dos vértices $\{1\}$ e $\{9\}$. Por fim, foram desenvolvidos algoritmos para o controle desses movimentos, que permitiram a manipulação intuitiva pelo usuário. Esses algoritmos foram baseados na simulação de pressões nos vértices, para os quais foram necessários inputs sobre a magnitude e direção dessas pressões (*Figura 54*). Desse modo, a configuração geométrica final dependia, sobretudo, de uma espécie de negociação entre os movimentos propostos e as restrições impostas.



a. Restrições impostas aos vértices.

b. Pressões nos vértices, deformando o sólido.

Figura 54: Sistema generativo combinando espectros de restrição e manipulação.

Fonte: Fischer, Burry e Frazer (2005).

Recentemente, Mueller (2014) também buscou demonstrar que essa negociação pode ser orientada por análises estruturais. Utilizando padrões geométricos obtidos de maneira generativa, a autora propôs inserções manuais, também por meio de pequenos ajustes. Com base em uma solução de treliça plana obtida por meio de um sistema generativo, foram reposicionados alguns nós, visando reduzir as regiões com concentração de tensões evidenciadas pelo Método dos Elementos Finitos. Essas pequenas mudanças representaram uma grande contribuição ao desempenho estrutural sem, contudo, alterar de maneira significativa o resultado gerado pelo sistema. Em algumas comparações entre as formas obtidas antes e depois do refinamento manual, observou-se uma redução de até 34% do consumo de material das estruturas, para o mesmo contexto de solicitações.

No pensamento projetual tradicional, frequentemente os arquitetos determinam a forma, enquanto os engenheiros civis buscam torná-la exequível. Algumas exceções ficam por conta das cúpulas de grandes vãos, das cascas e das membranas, que costumam ser caracterizadas pela mediação entre a geometria e as forças atuantes. Nos métodos contemporâneos de projeto, a interação entre os profissionais tem ocorrido nos estágios inicial de conceituação e, conseqüentemente, a estrutura eleita como solução não é um resultado da estética, ou da matemática, mas sim de um conglomerado com mais variáveis que expressam a investigação em diferentes assuntos, como uma síntese entre os conceitos utilizados (OXMAN, 2010).

Anteriormente ao uso dos computadores, questões como o equilíbrio estático das formas foram abordadas por meio de mensurações com modelos físicos em escala reduzida, embora as relações físicas entre o modelo reduzido e o objeto real não sejam proporcionais a redução de escala. Com o aprimoramento da tecnologia, um número de métodos numéricos foi desenvolvido, a fim de contornar as deficiências dos modelos experimentais. A utilização dos modelos físicos e virtuais como ferramentas de uma investigação formal foram propostos a partir da década de 1960, por Frei Otto, que investigou a protensão de membranas tensionadas com base no comportamento de estruturas naturais. As pesquisas de Otto sobre essas estruturas leves, são os primeiros registros da combinação entre os modelos físicos e os métodos computacionais de dimensionamento, com vistas a soluções ótimas em termos de desempenho (WAKEFIELD, 2006).

Essa pesquisa da forma visando a solução ótima tem sido denominada por *form-finding*²², cujo termo tem origens prováveis no clássico problema das sete pontes da cidade russa de Königsberg (atual Kaliningrad) que originou a Teoria dos Grafos no século XVIII, no qual Leonard Euler provou matematicamente a impossibilidade de atravessar todas as pontes sem repetir nenhuma. Nas áreas de arquitetura e engenharia civil, o *form-finding* expressa a exploração formal de soluções para os problemas determinação de uma forma construtiva. Embora nos ambientes exclusivamente computacionais o termo as vezes represente a otimização de formas com base em algoritmos, o *form-finding* pode ser entendido como quaisquer processos de exploração da forma, como os protótipos funiculares de Antoni Gaudí, no início do século XX (FUND, 2008).

²² Form-finding pode ser entendido como conjunto de procedimentos que visam de busca da solução formal.

Interpretações contemporâneas para as estruturas estaticamente determinadas por esforços solicitantes, como as de Gaudí, foram propostas por Kilian e Oschendorf (2005) e Kilian (2008). Estes autores simularam um sistema virtual de partículas elásticas, buscando produzir estruturas complexas determinadas pela ação gravitacional de peso próprio dos materiais, como no caso das curvas catenárias. No modelo computacional, estabeleceram-se partículas vinculadas a uma curva linear, cada uma com posição, velocidade e massa variável, assim como um vetor que resume todas as forças atuantes nas mesmas. Assim, as forças puderam ser aplicadas nas partículas, definindo-se direções e magnitude.

Tendo em vista que as formas ativas dos funiculares não rígidos produzem um sistema de transmissão de cargas oriundas de esforços normais simples, de tração ou compressão, tornou-se necessária uma adequação do sistema à condição tridimensional, consideravelmente mais complexo devido às múltiplas possibilidades de trajetórias para as cargas. Em uma das propostas, os autores estabeleceram uma malha ortogonal retangular com 25 quadrados em cada um dos sentidos (x e y), contendo uma partícula elástica de massa igual em cada cruzamento da malha. Aumentando-se de maneira uniforme a massa das partículas do centro para as extremidades e invertendo a malha visando um contexto de esforços de compressão, obteve-se o formato de uma cúpula, na qual foi possível controlar as deformações atuando nas propriedades de cada partícula de maneira independente (*Figura 55*).

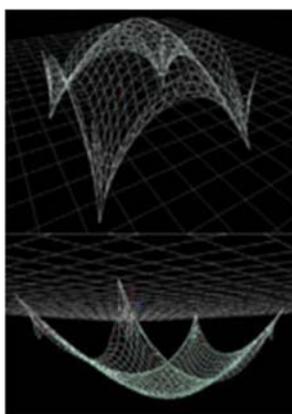


Figura 55: Determinação de uma gridshell por meio de partículas elásticas.

Fonte: Kilian e Oschendorf (2005).

Esse método de modelagem apresenta um potencial significativo, já que outros sistemas estruturais podem ser concebidos ou dimensionados com as mesmas partículas elásticas, incluindo treliças, lajes, vigas e outros elementos rígidos. No caso específico das *gridshells*, que são estruturas comumente determinadas por malhas bidimensionais, a discretização da

forma em seções funiculares empregando condições de carregamento em cada nó é uma abordagem comum nas práticas de dimensionamento. Essas análises podem ser claramente incluídas nos estágios iniciais do design estrutural, conduzindo a soluções eficientes, previamente pensadas em termos de desempenho (ADRIAENSSENS e BARNS, 2001).

Atualmente, alguns aplicativos permitem essas análises nos estágios iniciais do processo de projeto, baseando-se das mesmas noções de partículas, malhas e carregamentos. Alguns podem ser conectados automaticamente às plataformas paramétricas de design gráfico, permitindo combinar técnicas de modelagem paramétrica com a simulação instantânea de condições de exposição para as estruturas. O *add-on* Kangaro é um dos aplicativos que permite essa simulação interativa juntamente com os aplicativos gráficos paramétricos, caracterizando um cenário com momentos de decisão e otimização. Adicionalmente, a combinação da modelagem paramétrica com aplicativos de simulação fornece ao projetista a possibilidade de experimentar um elevado número de soluções. Atualizando constantemente a estrutura em virtude de diferentes cenários, o projetista pode inclusive divergir da solução ótima, tendo em vista que no processo de projeto busca-se mediar entre diversos objetivos, além do desempenho estrutural (VAN MELE, et al., 2012).

No caso específico das estruturas de malhas superficiais, como as *gridshells*, grande parte dos problemas de projeto que envolvem a determinação de malhas com base em superfícies livres se concentra em promover um desempenho estrutural satisfatório (WINSLOW, PELLEGRINO e SHARMA, 2009). Visando alternativas a essa problemática, os algoritmos evolutivos têm sido uma das ferramentas mais investigadas. Richardson, et al. (2013), por exemplo, utilizaram os algoritmos genéticos para a determinação de configurações de malha, a partir das posições dos nós. Após a definição de um conjunto de regras topológicas, foi estabelecida uma condição de carga uniformemente distribuída nos nós, que tipicamente representa uma síntese das diferentes cargas atuantes (cargas assimétricas, pontuais, etc.). Esses nós foram projetados ortogonalmente em um plano horizontal e, a partir das projeções, gerou-se um Diagrama de Voronoi, vinculando cada área à parcela de resistência contribuída por cada nó (*Figura 56*). Assim, os algoritmos cruzaram as variáveis topológicas com as análises estruturais, determinando mais ou menos nós em virtude de uma otimização das áreas, selecionando candidatos mais próximos à condição de desempenho ótimo e descartando outros distantes dessa condição.

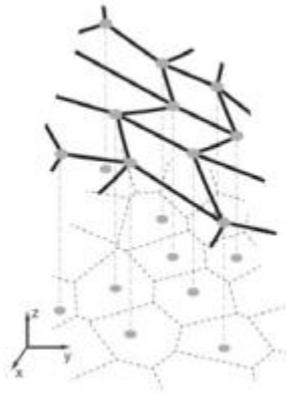


Figura 56: Determinação do Diagrama de Voronoi com base na projeção dos nós. Fonte: Richardson (2013).

Outras propostas de otimização diretamente ligadas à produção de estruturas de elevada complexidade foram discutidas por Pottmann (2013), sob a perspectiva das técnicas de planificação, conhecidas no âmbito do Design Computacional como ferramentas *paneling*. Essas ferramentas se referem à descrição aproximada de uma superfície (comumente não-desenvolvível) por painéis planos, de maneira a permitir sua fabricação com um custo razoável utilizando, por exemplo, o corte de chapas planas. Além da planificação de superfícies, o *paneling* também pode ser utilizado para a racionalização das estruturas de suporte das mesmas superfícies, além de suas conexões. Nesse processo, é necessário observar ainda as aproximações da descrição de superfícies por meio de planos, normalmente contabilizadas em graus de tolerância admitidos.

A racionalização de superfícies complexas constitui uma das mais fundamentais operações ligadas à sua fabricação. A viabilidade dos painéis, por exemplo, é governada, principalmente, pelo custo de produção dos moldes, de modo que existe uma clara pressão pela utilização de um número reduzido deles. Eigensatz et al. (2010) introduziram propostas para a determinação dos painéis, utilizando técnicas de otimização, a partir da definição de um espaço de busca baseado em tolerâncias, visando a adequação das distâncias entre os painéis. Desse modo, o sistema permitiu a manipulação da superfície, alterando o tamanho da malha em regiões específicas, por exemplo. Definida a solução, o sistema otimiza e agrupa os planos de mesma dimensão, padronizando assim a sua produção ().

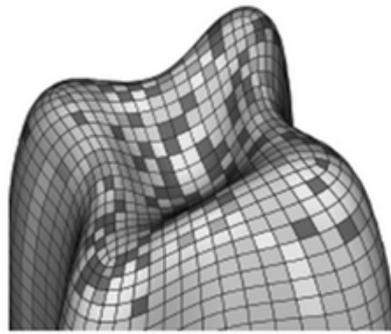


Figura 57: Painéis de mesma dimensão agrupados em conjuntos de cores por meio de uma ferramenta paneling. Fonte: Eigensatz et al. (2010).

Na via oposta ao *paneling*, existe também a obtenção de configurações espaciais a partir da projeção de formas bidimensionais nas superfícies. Atualmente, essas operações geométricas estão disponíveis em aplicativos de modelagem geométrica (3D), como no comando *Project Curve to Surface* do aplicativo Rhinoceros (MCNEEL, 2014). Do mesmo modo que na ideia do *paneling*, projeções desse tipo necessitam de delineamento em suas aproximações, a fim de corrigir sobreposições. Manahl, Stavric e Wiltsche (2012) propuseram um método para a compensação dessas sobreposições com base na interseção de planos tangentes. Nesse processo, as superfícies curvas correspondentes aos planos são obtidas com base nos pontos de interseção entre os mesmos resultando em uma paginação das superfícies próximas da paginação planimétrica. Esse processo permite uma grande interatividade, já que mudanças nas configurações planas podem ser atualizadas automaticamente nas superfícies (*Figura 58*).

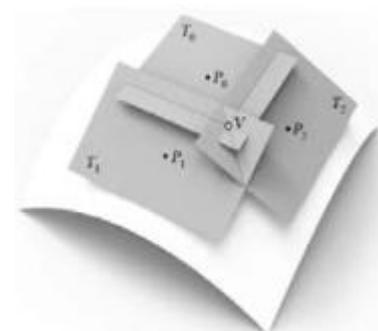


Figura 58: Projeção de configurações planas em superfícies. Fonte: Manahl, Stavric e Wiltsche (2012)

A convergência de liberdade geométrica e a automatização de etapas da concepção projetual permitidas pelas ferramentas generativas têm oferecido grandes oportunidades aos arquitetos de afastarem-se das composições tradicionais, com base em noções antigas como simetria e repetição. Nesse sentido, Shea, Aish e Gourtovaia (2005) também propuseram um método

visando integrar os modelos baseados em desempenho e os processos computacionais generativos. O sistema generativo proposto denominado Topologia Estrutural e Recozimento da Forma²³, buscou combinar um conjunto de regras para a composição estrutural com sua respectiva análise estrutural e otimização do desempenho por meio da simulação de um "recozimento" da forma, tal como entendido na engenharia de materiais.

Na Metalurgia e nas Ciências dos Materiais, recozimento significa um tratamento de aquecimento que altera as propriedades físicas e, às vezes, químicas, de um material, a fim de melhorar sua ductilidade e torná-lo mais trabalhável. O recozimento simulado²⁴ é um método de otimização estocástica utilizado para a solução de problemas de estruturas fixas. A analogia ao recozimento dos metais refere-se ao fato de que, em altas temperaturas, as soluções metálicas apresentam um comportamento mais aleatório, enquanto nas baixas temperaturas seu comportamento é mais estável. No recozimento simulado, diversas funções interagem até um estágio aleatório, quando é selecionada uma solução. Esta é avaliada e comparada com as funções estabelecidas, compondo uma base de candidatos eleitos como factíveis ou não (CAGAN, 1994).

A ideia do recozimento da forma combina o processo de otimização proposto pelo recozimento simulado como um sistema generativo de formas, a fim de determinar aleatoriamente padrões geométricos selecionados em um dado estágio. Na etapa generativa, Cagan e Mitchel (1993) consideram combinar regras em uma gramática de formas simples composta por meios hexágonos (*Figura 59*). Com essa linguagem, um incontável número de padrões geométricos pode ser gerado, a partir de diversas combinações. Como desafio, os autores propuseram alocar o maior número possível de meios hexágonos em um espaço retangular (*Figura 59*), utilizando as seguintes regras: 1) os padrões geométricos obtidos satisfazem a gramática proposta; 2) as peças não podem se sobrepor; 3) as formas devem se ajustar no contorno definido. A partir daí, utilizou-se o recozimento da forma: no caso das formas geradas não violarem as funções pré-estabelecidas, elas são então classificadas como elegíveis a solução.

A aplicação de Shea, Aish e Gourtovaia (2005) propõe introduzir o mesmo conceito de Cagan e Mitchel (1993), combinando os sistemas de geração e otimização para a determinação de treliças planas. Essa associação promoveu a capacidade de gerar modelos computacionais orientados segundo uma análise estrutural, a fim de obter um feedback instantâneo sobre as

²³ *Structural Topology and Shape Annealing*. Tradução nossa.

²⁴ *Simulated Annealing*. Tradução nossa.

formas produzidas. Desse modo, os cenários puderam ser modificados por novas especificações estruturais, incluindo a atualização de carregamentos na estrutura e verificando respostas do sistema generativo. A introdução desse raciocínio abriu uma porta a novos processos para design estrutural, principalmente a possibilidade de combinar a otimização de diversas variáveis (otimização multicritério) à potencialidade dos sistemas generativos de projeto.

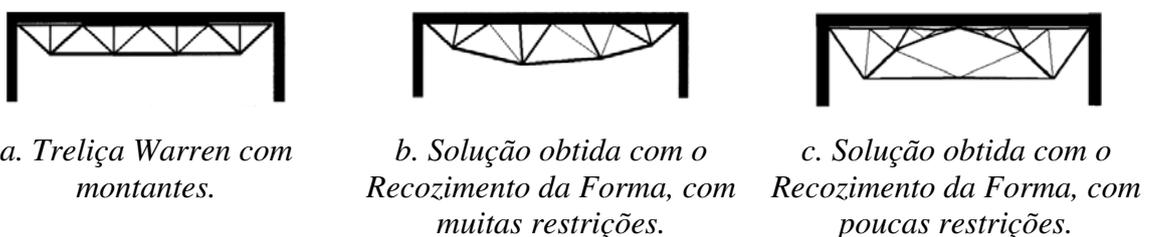


a. Gramática de formas com meios hexágonos.

b. Um dos resultados do recozimento da forma.

Figura 59: Combinação de sistema generativo baseado em regras (gramática de forma) e otimização estocástica (recozimento da forma). Fonte: Cagan e Mitchel (1993).

Anteriormente, Shea e Cagan (1999) já haviam concluído sobre a possibilidade do recozimento da forma em produzir estruturas factíveis ao comparar as soluções tradicionais de projeto com os resultados obtidos por meio de processos de otimização. Utilizando o recozimento da forma, os autores buscaram reproduzir exemplos de estruturas convencionais, como as treliças planas Pratt ou Warren. Comparando uma dessas soluções (Figura 60a) observou-se que a progressiva adição de restrições ao espaço de otimização (simetria, profundidade, tamanho), conduz a soluções cada vez mais próximas da solução convencional. Quando se promove um relaxamento dessas restrições, as soluções produzidas se tornam menos intuitivas e de comportamento estrutural mais complexo (Figura 60b,c).



a. Treliça Warren com montantes.

b. Solução obtida com o Recozimento da Forma, com muitas restrições.

c. Solução obtida com o Recozimento da Forma, com poucas restrições.

Figura 60: Comparação entre métodos tradicionais e generativos aplicados ao design estrutural de treliças. Fonte: Shea e Cagan (1999).

Em outras abordagens utilizando o recozimento simulado, Shea, Fest e Smith (2002) buscaram combinar a otimização estrutural com uma resposta dinâmica, tornando a estrutura ajustável às

solicitações imputadas à mesma. Os objetivos dessa pesquisa foram manter e aprimorar o desempenho estrutural a partir do reconhecimento de mudanças nas solicitações estruturais, utilizando eventos passados para aprimorar o desempenho futuro. Os modelos experimentais utilizados nessa proposta incluíram protótipos físicos de sistemas *tensegrity*, com sensores para a medição de deformação conectados a tubos telescópicos.

O protótipo físico foi carregado, descarregado e carregado novamente, gerando registro de memórias na estrutura. As medições de solicitações foram importadas em um modelo virtual, que realiza automaticamente sua otimização por meio do recozimento simulado. As respostas do processo de otimização são traduzidas em aumento ou redução dos níveis de intensidade na tração dos cabos. A intensidade da tração é possibilitado por dispositivos eletrônicos que aumentam ou diminuem os tubos telescópicos. A partir daí os níveis de tensão registrados no dispositivo são armazenados e o mesmo comportamento é reproduzido novamente quando a estrutura "percebe" o mesmo contexto de solicitações.

Embora as estruturas sejam pensadas estaticamente, a noção projetual é sempre buscar antecipar uma condição de exposição a ser verificada em sua condição de serviço. Com a incorporação de controles ativos de mudanças na geometria, a estrutura se torna um objeto dinâmico com a capacidade de interagir com o ambiente. Os resultados obtidos nesse experimento encorajam a integração entre o controle computacional, além de inserir uma nova variável ao processo de projeto, que é justamente a sua dimensão ativa. Desse modo, os aspectos responsivos e adaptativos, tanto dos modelos virtuais quanto físicos, tornam-se passíveis de serem trabalhados sob diferentes pontos de vista (FEST, et al., 2003).

Processos desse tipo ganham mais preponderância nos ambientes de fabricação digital, nos quais os modelos geométricos são diretamente conectados aos equipamentos de fabricação. Desse modo, grande parte das explorações computacionais que buscam o design de estruturas de elevada complexidade encontram aporte nos meios digitais de prototipagem e fabricação, a fim de conseguir traduzir um modelo computacional e abstrato, em algo efetivamente factível. As técnicas de fabricação mais tradicionais guardam grandes relações com os métodos artesanais de produção e sua viabilidade produtiva tem sido obtida, ao longo do tempo, por métodos industriais de produção. Esses métodos envolvem, em sua maioria, a padronização de peças, buscando a repetição dos meios de fabricação e montagem. No contexto da complexidade estrutural, isso pode ser conseguido por meio de técnicas de digitalização da

manufatura, aproximando os processos de modelagem e fabricação por meio das tecnologias CAD-CAM (KOLAREVIC e MALKAWI, 2005).

Embora a incorporação dessas técnicas pelos arquitetos e engenheiros civis tenha sido mais lenta do que nas áreas de Engenharia Mecânica e Aeroespacial, por fatores diversos, como as escalas e a mobilidade, as iniciativas de inserção dos meios digitais na construção civil têm sido cada vez mais frequentes. Uma delas foi descrita por Agkathidis e Brown (2012), que utilizaram a fabricação digital no design e produção de uma estrutura de cobertura de perfis tubulares. Nesse projeto foram investigadas técnicas de fabricação e montagem, baseando-se em abordagens contemporâneas do Design Computacional e colaborativo, com foco na produção de componentes não padronizados. Para a superfície de cobertura, propôs-se uma divisão planimétrica utilizando conceitos do Diagrama de Voronoi, de maneira semirregular. Devido à complexidade das conexões, algumas delas conectando até cinco tubos dispostos em diferentes eixos, definiram-se unidades compostas de tubos conectados, já com vistas à montagem da estrutura. Concluindo que os sistemas de representação 2D inviabilizariam por completo a descrição dessas configurações, optou-se por um processo de fabricação digital de corte a plasma, tendo em vista que as seções de corte haviam sido facilmente definidas pela modelagem paramétrica (*Figura 61*).



a. Modelo 3D de exportação para o equipamento CNC.



b. Serviços de pré-montagem do elemento (pintura).

Figura 61: Técnicas contemporâneas utilização na fabricação de uma estrutura de elevada complexidade.

Esses equipamentos também estão disponíveis no parque industrial brasileiro, como demonstraram Barbosa et al. (2012), ao propor a integração entre técnicas contemporâneas de design e fabricação no projeto de um balcão de escritório e, anteriormente a eles, Silva et al. (2009), que realizou um levantamento do parque industrial brasileiro e detectou ampla presença desses equipamentos. No primeiro estudo, além das técnicas de simulação e modelagem, o

processo foi assistido pela construção de vários protótipos físicos utilizando tecnologias de corte a laser, similares às que seriam utilizadas na fabricação do produto final. Na fabricação e montagem finais, as técnicas de corte a plasma, utilizadas frequentemente na produção de peças para a indústria, seguiram os mesmos padrões dos arquivos utilizados na produção dos protótipos. Essa aproximação de técnicas entre o projeto e a fabricação tem aproximado novamente o arquiteto das etapas de produção (SILVER, 2008).

A questão da *multivariabilidade* de conexões em estruturas complexas tem motivado pesquisas atuais, como a Smart Nodes, coordenada por O'Donnell (2014) e patrocinada pela empresa ARUP. Uma das justificativas dessa pesquisa é que, mesmo em estruturas tubulares não muito complexas, é comum a necessidade de conexões que contemplem diferentes ângulos, o que às vezes requer a fabricação de muitas conexões sob medida. Além disso, a condição de exposição das estruturas promove diferentes tensões na região das ligações, exigindo diferentes quantidades de material nas mesmas. A produção de conexões em impressoras 3D oferece um potencial para a economia de material, juntamente com a otimização da estrutura. Isso pode contribuir com muitos benefícios, dentre eles a redução de peso da estrutura, tornando-a mais econômica e eficiente (*Figura 62*).



Figura 62: Uma das conexões da pesquisa Smart Nodes. Fonte: O'Donnell (2014).

A aplicação dessas pesquisas tem sido verificada, cada vez com mais frequência, nos projetos contemporâneos de arquitetura, caracterizando a fabricação digital como ferramenta de produção também dos ambientes construídos. Além disso, os métodos digitais de modelagem e fabricação tem permitido modos de controle muito eficientes das soluções projetuais, por meio de plataformas integradas, em que os conhecimentos de várias disciplinas podem ser compartilhados no mesmo modelo colaborativo. Um exemplo recente dessa aplicação prática foi o projeto do estádio Aviva, dos escritórios Populos e HOK Sport, construído na capital irlandesa Dublin, em 2010. Nesse exemplo, a vinculação direta entre design e produção, dentro

de uma plataforma colaborativa, contribuiu decisivamente para a identificação e resolução de problemas potenciais ainda nos estágios iniciais do processo de projeto (SHEPHERD, HUDSON e HINES, 2011; HUDSON, SHEPHERD e HINES, 2011).

De acordo com Eastman (2007), a modelagem paramétrica da geometria soluciona muitos dos problemas relacionados ao intercâmbio de informações na arquitetura e ainda contribui para a redução de incongruências de desenho quando as informações de projeto são diretamente ligadas aos sistemas de fabricação. O compartilhamento de modelos geométricos 3D facilita a comunicação com os demais agentes durante o processo de projeto e execução. Nesse novo contexto, as cotas de dimensão tornam-se praticamente desnecessárias, servindo no máximo para uma conferência da escala das peças produzidas. Não é mais necessário fazer a definição geométrica de cada ponto das curvas, uma vez que o arquivo digital é interpretado diretamente pelos equipamentos de produção. Para Kolarevic (2010), a consequência disso é que o arquiteto tem se tornado muito mais diretamente envolvido nos processos de fabricação, uma vez que a informação por ele transmitida ao fabricante segue diretamente para o equipamento de fabricação digital

Capítulo Quatro

Materiais e Métodos



Nós construímos modelos para conhecer a forma e, uma vez obtida, nós também construímos modelos para conhecer o que acontece dentro dela.”

————— FREI OTTO, 2010

Em entrevista concedida a Juan María Songel

Desenvolvimento Incremental e Iterativo é um método tradicionalmente utilizado na Engenharia de Software, que combina as noções da construção incremental e do design iterativo, para o desenvolvimento de aplicativos. Esse conjunto de procedimentos compreende duas noções: 1) modelo em cascata, na qual se concebe uma ideia global para, em seguida, esmiuçá-la em partes; 2) prototipagem, que é produção de uma amostra inicial, modelo ou versão do aplicativo para testar um conceito, processo, ou atuar como um elemento a ser replicado ou apreendido (MARCINIAK, 2001). O resultado é considerado suficiente quando os requisitos estabelecidos são satisfeitos.

A construção incremental consiste em atribuir incrementos a um produto ou núcleo essencial, que recebe a funcionalidade central do sistema. Posteriormente, são adicionadas a esse núcleo melhorias (incrementos), que correspondem ao acréscimo de outras funcionalidades. O desenvolvimento de funcionalidades e melhorias não acontece necessariamente de modo sequencial, principalmente quando existe uma grande interdependência entre partes. Ao longo

da construção de incrementos existe a iteração, que trata de um processo cíclico de prototipagem, teste, análise e refinamento do produto ou processo. Um novo objeto é sucessivamente criado a partir do resultado que o precede e, desse modo, são geradas versões, que correspondem a implementação de iterações.

Com base nessas noções, esta pesquisa tem um marco teórico exploratório, no qual se busca a aproximação a particularidades do design de estruturas espaciais de elevada complexidade, a fim de tornar essa atividade mais explícita e construir hipóteses sobre seus processos projetuais. Com base nos objetivos apresentados, propõe-se um conjunto de procedimentos descritivos e prescritivos visando a construção de um sistema generativo de projeto com propriedades auto-organizáveis, baseadas na semântica computacional dos autômatos celulares. Os procedimentos se concentraram, sobretudo, na síntese de técnicas utilizadas atualmente no Design Computacional e nas noções oriundas da computação bioinspirada, com o direcionamento desta última ao design estrutural.

Em vista disso, propõe-se uma apropriação do Desenvolvimento Incremental e Iterativo adaptando-o ao delineamento científico das áreas de Arquitetura e Design Computacional. Por meio de procedimentos não necessariamente sequenciais, organizados de maneira cíclica e com sobreposições, define-se um marco introdutório (estudos de caso) e um marco conclusivo (exercício projetual), dentro de três grupos de ações (Figura 63):



Figura 63: Desenvolvimento Iterativo e Incremental.

- Requisitos, análise e planejamento: procedimentos de reengenharia e engenharia reversa em estudos de caso, elaboração de um programa de necessidades e esboços preliminares de algoritmos.
- Implementação e desenvolvimento: prescrições concretas de soluções computacionais, desenvolvidas a partir de conclusões empíricas obtidas nos outros dois grupos.

- Avaliações, testes e validação: procedimentos de exequibilidade do sistema generativo proposto, por meio das análises estruturais com protótipos virtuais e físicos e um exercício projetual.

4.1 REQUISITOS, ANÁLISE E PLANEJAMENTO

Os estudos de caso são uma modalidade de pesquisa amplamente empregada nas áreas de Arquitetura, Engenharia, Ciências Sociais e Biomédicas. Consiste de um aprofundamento em um ou poucos objetos, de modo a permitir seu amplo e detalhado conhecimento, tarefa praticamente impossível em outros delineamentos científicos. Embora durante anos, a utilização dos estudos de caso como método científico tenha sido vista como um procedimento pouco rigoroso, atualmente é considerado o método mais adequado para a investigação de um fenômeno contemporâneo, dentro de seu contexto real, em que os limites entre o fenômeno e o contexto não são claramente percebidos (YIN, 1993).

Assumindo que as estruturas de elevada complexidade são situações da vida real de caráter individual, a descrição de seus limites e contextos não são claramente definidos e, portanto, essas experiências de projeto permitem poucas generalizações. Com base nisso, propõe-se efetuar procedimentos descritivos em corpus representativos de estruturas de elevada complexidade, com diferentes abordagens sobre o tema. Assim, se buscará a fragmentação conceitual dessas estruturas utilizando procedimentos de engenharia reversa, que consistirão da análise dos sistemas estruturais a partir de sua representação em níveis de abstração mais elevada, isto é, voltando atrás em seu ciclo de desenvolvimento.

De posse dessas descrições esmiuçadas, serão efetuados procedimentos denominados aqui por reengenharia, com alguma distinção semântica dada ao termo nas áreas empresariais e na Engenharia de Software. Nessas áreas, a reengenharia pode ser entendida como "o redesign de um processo para a redução do número de atividades redundantes, melhorando a eficiência do mesmo" (HAMMER, 1997), ou como "o exame e a alteração de um sistema, a fim de reconstruí-lo de uma nova maneira, seguida de sua implementação" (CHIKOFSKY e CROSS II, 1990). Em ambas as definições, a reengenharia é um processo que vai além das descrições, pois, a partir das representações, monta-se uma nova estrutura de funcionamento para a solução do problema, que não seja meramente uma cópia.

Os procedimentos de reengenharia propostos nesta pesquisa contemplarão a realização do *redesign* estrutural das estruturas dos estudos de caso por outros métodos. Além disso, visando delinear a abrangência das noções utilizadas nesses casos, se buscará explorar outras configurações formais utilizando os mesmos conceitos. Para isso, serão utilizadas ferramentas computacionais de modelagem paramétrica, esmiuçando a geometria estrutural, por meio de parâmetros variáveis. A identificação de limites para essas variáveis orientará a construção de hipóteses questões passíveis de generalização.

Em síntese, a partir da engenharia direta das estruturas, será efetuada uma descrição abstrata, visando uma nova reconstrução concreta, com ferramentas que permitam a variação das formas resultantes, promovendo resultados diferentes dos originais (). Outras conclusões sobre esse procedimento se concentrarão na avaliação crítica das estratégias utilizadas contrapondo a produção da complexidade com questões de exequibilidade produtiva. Essa avaliação permitirá identificar dificuldades a serem defrontadas nas fases posteriores da pesquisa.



a. Modelo tradicional de engenharia reversa e de reengenharia. Fonte: Adaptado de Chikofsky e Cross II (1990).

b. Modelo adaptado a esta pesquisa. Fonte: ilustração nossa.

Figura 64: Níveis de abstração dos processos de reengenharia.

Em síntese, neste estudo de caso, se buscará o enfoque aos aspectos da geometria estrutural, que envolvem a configuração de poliedros para a obtenção de padrões complexos tridimensionais. Desse modo, formularam-se três questões passíveis de investigação, que balizarão a obtenção de informações. Essas questões foram vinculadas a métodos exploratórios, que têm como objetivo delinear a abrangência dos conceitos utilizados no design estrutural do edifício para outras situações de projeto (*Quadro 4*).

A fim de contemplar as questões mencionadas, estabeleceram-se os seguintes critérios para a seleção dos estudos de caso:

- *Complexidade*: conforme definido no Capítulo Dois, foram selecionadas estruturas de difícil apreensão em virtude da quantidade e da configuração dos elementos;
- *Espacialidade*: conforme definido no Capítulo Três, selecionaram-se as estruturas cuja ação estrutural é, por excelência, tridimensional;
- *Computabilidade*: selecionaram-se estruturas cujos conceitos geométricos foram gerados por meio de linguagens de programação;
- *Irregularidade aparente*: foram selecionadas estruturas cujas soluções buscaram combinar, simultaneamente, formas irregulares e racionalidade construtiva.

Simultaneamente aos estudos de caso, será efetuado o planejamento preliminar do sistema generativo de projeto. Em vista disso, preveem-se algumas ações exploratórias, a fim de concatenar ideias acerca dos algoritmos pretendidos:

- Estabelecer o escopo dos algoritmos clarificando concretamente seus objetivos;
- Desenvolver mecanismos de manipulação da geometria dentro dos domínios dos autômatos celulares;
- Traçar estratégias preliminares de programação computacional (variáveis, parâmetros, operadores) com base em linguagens orientadas a objetos;
- Especular possíveis cenários para o sistema generativo, a partir de implementações preliminares;
- Estimar limitações e possibilidades das linguagens de programação, buscando conciliar o potencial computacional e a interface harmônica com aplicativos CAD atualmente utilizados em projetos de arquitetura.

Quadro 4: Vinculação entre procedimentos e questões.

Questões passíveis de investigação	Procedimentos vinculados
Como foram obtidas as configurações tridimensionais?	Descrever geometricamente os módulos utilizando ferramentas de modelagem paramétrica e prototipagem rápida, a fim de explorar outras configurações tridimensionais utilizando os mesmos conceitos.
Outras possibilidades de fachadas são viáveis de ponto de vista da exequibilidade?	Investigar outras formas de encapsular a estrutura, além do cuboide, como os sólidos de revolução, outros poliedros regulares e irregulares e formas amorfas.
Houveram ganhos na personalização dos elementos de conexão (nós estruturais) em relação à sua padronização?	Explorar outras possibilidades de conexão, a partir da descrição de barras e ligações da estrutura, buscando comparar as noções de personalização em massa por meio de equipamentos de controle numérico computacional com produção padronizada de elementos.

Baseando-se nesses critérios e na avaliação de diversos projetos de estruturas contemporâneas, foram selecionadas as estruturas de dois edifícios: 1) O Centro Aquático Nacional de Pequim,

que denominaremos como Watercube; 2) O Átrio Norte da Praça da Federação de Melbourne, que denominaremos como Fedsquare (Federation Square North Atrium). Na aquisição, tratamento e armazenamento dos dados desta etapa serão utilizadas representações bidimensionais (plantas, seções e vistas), planilhas eletrônicas, modelos virtuais paramétricos e modelos físicos das estruturas produzidos digitalmente. A seguir, são apresentadas, de maneira sintética, as características dos projetos selecionados como estudos de caso.

4.2 IMPLEMENTAÇÃO E DESENVOLVIMENTO

Este grupo de ações refere-se à fase de construção propriamente dita do sistema generativo, na qual se estabelecem estratégias para a sua implementação. Com base nas definições do Desenvolvimento Incremental e Iterativo, prevê-se a construção de um modelo preliminar contendo uma funcionalidade central, relacionada a geração automatizada de modelos de estruturas espaciais, e a inserção de incrementos, relacionados aos aspectos de exequibilidade. A funcionalidade central será computada buscando a exploração de padrões geométricos baseados em autômatos celulares e a auto-organização dos mesmos segundo geometrias propensas ao funcionamento de estruturas arquitetônicas. A essa funcionalidade central serão atribuídos três grupos de incrementos: 1) propriedades geométricas dos componentes, que constituirão o banco de dados de informações sobre elementos e materiais disponíveis; 2) disposições estruturais, que é a incorporação de conceitos advindos de normas técnicas utilizadas no dimensionamento de estruturas; 3) conexões paramétricas; que são propostas de ligações auto ajustáveis aos padrões geométricos gerados.

Existe uma extensa gama de estratégias para a geração de padrões gráficos baseados em autômatos celulares, cujas definições fundamentais foram apresentadas Capítulo 2. Conforme mostrado, algumas conduzem a determinados padrões geométricos, nos quais a definição de qualquer ordenamento é uma tarefa demasiado complexa, ou tecnicamente impossível. Outros padrões exibem estruturas intrincadas, mas com certos níveis de regularidade. Nesses últimos, a geometria apresenta ciclos repetitivos com comportamentos recursivos. Nas primeiras ações deste grupo se buscará explorar padrões que apresentem de maneira simultânea, complexidade e alguma regularidade.

A partir dos padrões identificados serão propostos algoritmos que gerem ordenamentos de células em posições definidas. Essas posições serão identificadas, a fim de permitir sua

manipulação. Dados como a quantidade e posição de células serão utilizados para a determinação de formas de associação entre as mesmas. A exploração de possibilidades para essas associações terá como fundamentos norteadores, dois princípios básicos:

- Funcionalidade generativa: proposição de autômatos celulares em organizações espaciais, cujas propriedades elevam gradualmente sua complexidade por meio da repetição comportamentos regulares.
- Funcionalidade auto organizacional: proposição de algoritmos que definam as formas de associação entre as células consideram-se requisitos como a quantidade e posição das mesmas.

Dentro de plataformas de CAD 3D, se utilizarão esses dois conceitos, definindo estágios iniciais e as funções capazes de apresentar uma funcionalidade generativa de configurações geométricas compatíveis com os objetivos dos sistemas estruturais espaciais. A ideia fundamental é explorar a capacidade dos autômatos para gerar padrões complexos, a partir de funções simples, ao mesmo tempo agregar a esses padrões, formações geométricas que possam desempenhar, de maneira eficiente, as funções estruturais. Desse modo, as características principais desse sistema generativo serão o direcionamento de processos não determinísticos, com um certo grau de aleatoriedade estocástica, para a promoção de padrões complexos, auto organizáveis e, ao mesmo tempo, com regularidades não diretamente identificáveis.

Propõe-se a vinculação dos seguintes conjuntos incrementos ao sistema generativo:

- Propriedades geométricas: incorporação de base de dados contendo informações sobre propriedades geométricas dos materiais a serem utilizadas no projeto de estruturas. A objetivo destes incrementos é atribuir ao modelo informações que permitam vincular os aspectos produtivos aos estágios iniciais do design, facilitando a presciência neste estágio, de condições comumente verificadas nas etapas de dimensionamento estrutural. Para isso serão utilizadas coleções de dados, organizadas em modelo relacionais, a fim de permitir a construção de um modelo lógico de armazenamento. As entidades armazenadas se constituirão de bases numéricas que relacionam geometria e materiais componentes, como os perfis tubulares de aço apresentados no Anexo B.
- Disposições estruturais: incorporação de conceitos oriundos das normas de dimensionamento de estruturas, combinando restrições relativas a questões sobre o comportamento global das estruturas e a questões locais, como seções transversais e

conexões. Embora, por limites de norma, algumas dessas definições contemplem apenas os casos de estruturas planas, algumas restrições como limitação da inclinação das diagonais proposta pela norma NBR/CB-02 (ABNT, 2011), ou a limitação da esbeltez das diagonais, com base no índice de esbeltez para barras bi-articuladas, proposto pela NBR8800 (ABNT, 2008), se constituirão como ferramentas de aproximação entre as etapas de concepção e dimensionamento.

- Conexões paramétricas: propostas de conexões estruturais com base nas noções de geometria associativa, visando permitir o ajuste automático das mesmas a diferentes configurações geométricas de estruturas. Para isso, serão exploradas computacionalmente, possibilidades de promover simultaneamente a adaptação a situações diversas: quantidade e inclinação de barras, rigidez da conexão, etc., e viabilidade produtiva, dentro do contexto da personalização em massa, que envolve técnicas de modelagem paramétrica e de fabricação digital.

4.3 AVALIAÇÃO, TESTES E VALIDAÇÃO

Tendo em vista os aspectos da iteratividade, algumas questões de análise estrutural tornam-se necessárias, a fim de fornecer um feedback ao desenvolvimento de algoritmos, sem, contudo, pretender inquirir sobre o dimensionamento propriamente dito, de estruturas espaciais. As avaliações pretendidas neste item permitirão obter conclusões sobre a exequibilidade das estruturas, que podem orientar os estágios conceituais do processo de projeto. A concretização de estruturas de elevada complexidade são resultado da reunião de vários outros conhecimentos e, nos aspectos de dimensionamento, análises mais sofisticadas são necessárias à sua efetiva concretização.

No entanto, no recorte estrito do design estrutural, o pré-dimensionamento é capaz de fornecer informações cruciais, tanto do ponto de vista do comportamento físico-mecânico quanto da viabilidade produtiva. Sob esse ponto de vista, propõe-se avaliações e testes a partir da construção de protótipos virtuais e físicos, a fim de extrair conclusões sobre as potencialidades e limitações do sistema generativo em relação aos métodos tradicionais de projeto. Além disso, visando validar o sistema proposto enquanto ferramenta projetual, propõe-se um exercício de menor abstração, submetendo o sistema a uma situação real de projeto.

Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. Por meio de técnicas de modelagem, os meios são divididos em malhas de elementos finitos e, cada um deles, recebe simulações de cenários possíveis de cargas e apoios. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidas conclusões sobre o comportamento global do meio. A popularização do MEF como ferramenta de análise estrutural se deu devido à sua generalidade para a avaliação de diversas tipologias de estruturas e à fácil implementação em plataformas computacionais.

- Estudos estáticos: determinação de deslocamentos, forças de reação, deformações, tensões e distribuição do fator de segurança;
- Estudos dinâmicos: determinação de respostas nos modelos a partir de ações aplicadas subitamente, com tempo e frequência;
- Estudos de instabilidade por flambagem: determinação de deformações súbitas provocadas por solicitações axiais; estruturas delgadas sujeitas a essas solicitações pode apresentar a ruptura precoce sob cargas muito menores do que as necessárias para a ruptura do material. Tendo em vista o fato da instabilidade ocorrer de formas diferentes, sob o efeito de cargas distintas, em muitos casos, até mesmo a menor das solicitações pode ser de interesse.

Além disso, se buscarão aplicativos que permitam a definição de metas, objetivos e restrições relacionadas à otimização estrutural, como a quantidade mínima de material a ser utilizada em um determinado elemento, ou o limite de tensão admissível.

Por meio desses dois tipos de procedimentos, serão produzidos protótipos físicos com vistas às avaliações estruturais similares às efetuadas nos protótipos virtuais, com a utilização de cargas fixas e observações de condições de estabilidade. No entanto, além das relações com a prototipagem virtual, propõe-se a avaliação de aspectos ligados à exequibilidade, comparando métodos tradicionais de projeto e com as plataformas de projeto e fabricação atuais. Desse modo, poderão ser discutidas as circunstâncias em que as técnicas de fabricação digital poderão ser implementadas e em quais aspectos a prototipagem rápida pode contribuir ao design estrutural.

A fim de demonstrar a aplicabilidade do sistema generativo proposto, sugere-se um exercício projetual permeando questões que compõe um problema de arquitetura e urbanismo.

- Definição de um problema de projeto definindo situações a serem resolvidas pelo método proposto;
- Estabelecimento de condições de contorno a serem consideradas no design estrutural, como materiais utilizados, cargas e ações em situações de serviço, etc.;
- Construção de um exercício controle, utilizando-se uma abordagem de projeto mais *top-down*, por meio de modelagem paramétrica, propõe-se o design de uma estrutura espacial considerando as mesmas condições de contorno.

Com base no recorte analítico proposto, se buscará focar questões relacionadas à complexidade e geometria estrutural, sem permear questões subjetivas que envolvem a prática de arquitetura. Do mesmo modo que nos estudos de caso, formularam-se três questões passíveis de investigação, que balizarão a obtenção de informações. Essas questões foram vinculadas a métodos exploratórios, que têm como objetivo delinear a abrangência dos conceitos utilizados no design estrutural do exercício proposto para outras situações de projeto.

Capítulo Cinco

Estudos de caso



Como arquiteto, se projeta no presente, com consciência do passado, para um futuro que é essencialmente incerto.”

————— **NORMAN FOSTER, 2007**
Em palestra ao TED Talks, em Munique

Os edifícios selecionados como estudos de caso possuem características similares, principalmente relacionadas às estratégias de concepção dos sistemas estruturais dentro do contexto do projeto arquitetônico. Em ambos os casos foram utilizadas definições matemáticas que permitiram elaborar um modelo capaz de expressar uma intenção arquitetônica, a partir do entendimento da estrutura como um elemento de composição da forma. Essas definições tiveram um papel crucial no delineamento de questões típicas desses projetos, determinando a flexibilidade dos modelos às constantes mudanças dos estágios criativos. Não há dúvidas de que os métodos utilizados se valeram das estruturas como um elemento a ser explorado e esta é a principal razão para a sua seleção: são edifícios nos quais a estrutura foi projetada como uma solução de arquitetura em detrimento de uma adaptação posterior à concepção da forma.

Justamente a forma foi também a outra motivação para este estudo, já que nos dois edifícios elas apresentam uma simplicidade instigante, composta de formas puras, com superfícies planas e paralelas, funcionando como um grande invólucro para as suas estruturas demasiadamente

complexas. Contudo, como se buscou identificar ao longo deste estudo, as abordagens projetuais empregadas nos dois casos possuem aspectos promissores no contexto contemporâneo da arquitetura, não somente por permitir expressar a complexidade através das estruturas, mas, sobretudo, por aproximar o projetista de questões anteriormente ignoradas nos estágios iniciais do processo de projeto.

Da mesma maneira que um arranjo molecular repetitivo, os projetos desses edifícios encontraram suas soluções em definições matemáticas que envolvem repetição e simetria, a partir de um conjunto de poucos elementos, denominados aqui blocos elementares. A associação desses blocos, combinando-os até os níveis nos quais se torna difícil reconhecer sua relação com o todo, é o denominador comum de ambas as propostas. Possivelmente, as técnicas de modelagem empregadas nos projetos dos edifícios permitem alguma generalização, mas, certamente, as motivações conceituais funcionam como uma alternativa ao pensamento sobre estruturas dentro de um contexto mais amplo.

Entender e descrever essas abordagens, esmiuçando-as até o nível desses blocos elementares, consistiu na primeira parte deste estudo de caso, em um processo que envolveu a análise de documentos de projetos dos escritórios Lab Studio e PTW, incluindo conversas com os arquitetos australianos John Bilmon e Donald Battes, respectivamente responsáveis pelos projetos do Watercube e do Fedsquare. Além disso, visitas técnicas nas cidades de Pequim e Melbourne permitiram compreender questões muito além das observadas nas plantas ou nos modelos virtuais, as quais se buscou registrar por meio de textos, desenhos e imagens.

As informações levantadas nutriram um modelo virtual de dados utilizado como um mecanismo para explorar os conceitos utilizados nos dois edifícios. Nesse processo, os principais aplicativos computacionais utilizados foram o Rhinoceros 3D (McNell & Associates, Inc., versão 5 RS5) incrementado por métodos baseados na biblioteca de classes Rhinocommon SDK, por meio de cápsulas gráficas do *add-on* Grasshopper 3D (versão 0.9.0076) ou manipuladas diretamente por *scripts* da linguagem Python (Python.org, versão 3.5.2). Eventualmente, outras ferramentas computacionais tiveram um papel secundário, auxiliando na produção de planilhas eletrônicas e desenhos vetorizados e imagens *raster*.

5.1 WATERCUBE

O edifício Centro Aquático Nacional de Pequim (*Quadro 5*), popularmente conhecido como Watercube, foi construído para abrigar as competições de natação dos Jogos Olímpicos de 2008. Apesar de seu apelido carregar o termo "cubo", sua forma geométrica é um cuboide (caixa retangular) de 178 metros de largura e 31 m de altura. A proposta do escritório PTW Architects em parceria com os escritórios Arup, The China State Construction Corporation e Shenzhen Design Institute surgiu da intenção de produzir um ícone estético e marcante por sua complexidade, que expressasse simbolicamente o movimento da água (POHL, 2008).

Quadro 5: Ficha técnica do Watercube.

Centro Aquático Nacional Pequim, China 2003–2008

Título original:

北京国家游泳中心

Cliente:

Governo da República Popular da China e Prefeitura de Pequim

Arquitetura PTW Architects

Diretor e associados: John Bilmon

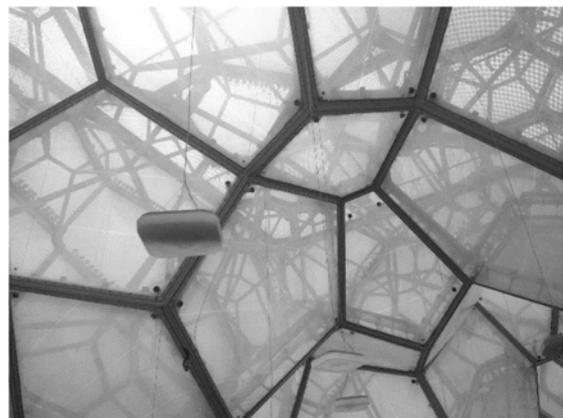
Mark Butler, Chris Bosse Equipe de projeto: Andrew Frost, John Pauline, Stephen Bai, John Blanchard, Alan Crowe, Michael Lam, Kurt Wagner, Tim Brouw, Ingrid Toser

Engenharia Estrutural CSCEC+design team leaders

Zhao Xiaojun, Wang Min, Shang Hong

Arup

Tristram Carfrae, Mark Arkinstall, Peter Macdonald, Kenneth Ma, Haico Schepers, Ken Conway, Mark Lewis



Fonte: Ilustração nossa.

Conceitualmente, a primeira ideia foi materializada por uma caixa de bolhas, tal como uma espuma representada por círculos com raios variados, interceptando-se mutuamente. Nesse partido inicial, os círculos foram representados por elementos da estrutura que produziram um arranjo complexo e irregular, cuja funcionalidade se mostrou inconsistente. Após um processo difícil e demorado de modelagem, que resultou em um elevado número de protótipos físicos de

partes da estrutura produzidos com técnicas de estereolitografia, concluiu-se que a composição, enquanto sistema estrutural, era pouco factível e extremamente onerosa.

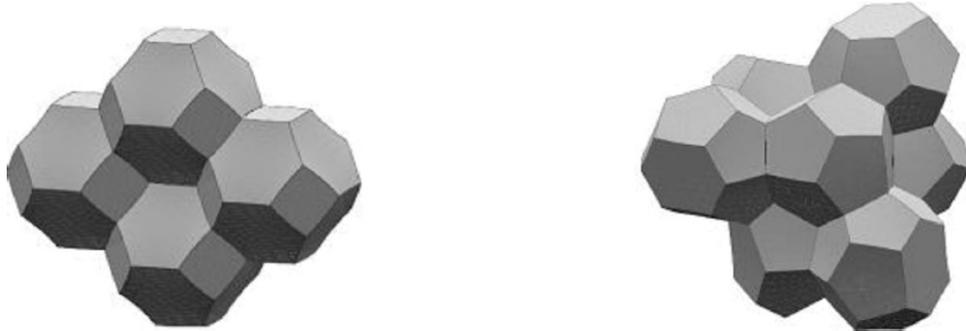
Alternativamente, o escritório Arup propôs substituir essa composição irregular por uma estrutura que tivesse o aspecto de irregular, mas que fosse, de fato, regular. A estratégia consistia em empilhar um elevado número de poliedros idênticos, com várias faces, a fim de se obter uma forma mais próxima a uma esfera, de maneira a guardar semelhanças com a forma inicial de bolhas. O artifício do empilhamento, que tem o mesmo princípio das treliças octet de Fuller, mostradas no Capítulo Três, permitia que os poliedros fossem facilmente trocados durante a exploração da forma e, dessa maneira, combinações com decaedros, dodecaedros e icosaedros puderam ser experimentadas.

Encontrar uma forma geométrica que representasse uma reunião de bolhas foi a base da hipótese proposta pelo físico belga Joseph Plateau, no final do século XIX, que pressupôs que a formação da espuma não era um processo aleatório. A partir da construção de vários modelos matemáticos, Plateau estabeleceu princípios fundamentais para a formação das espumas em condições estáticas. A Lei de Plateau inspirou diversas outras conjecturas, como a hipótese do matemático inglês Lord Kelvin, que se dedicou a determinar qual combinação de poliedros permitiria maximizar a área superficial desses sólidos em um espaço regular de 1 m^3 . O resultado desse estudo foi o empilhamento de octaedros truncados conhecido atualmente por Conjectura de Kelvin (WEAIRE; HUTZLER, 1999).

Mais de um século depois e utilizando ferramentas de otimização computacional, os pesquisadores Weaire e Phelan (1994) simularam outra combinação de poliedros como alternativa ao problema proposto por Kelvin. A Espuma *Weaire-Phelan*, que utiliza poliedros de dois tipos, o dodecaedro (12 lados) e o tetradecaedro (14 lados), permitiu agregar uma área superficial ligeiramente maior que a Conjectura de Kelvin, cerca de 0,3% a mais de sólidos no mesmo volume de 1 m^3 . Desse modo, a Espuma *Weaire-Phelan* passou a ser a solução ótima para a hipótese lançada por Kelvin, mesmo ainda não tendo sido provada de maneira definitiva no âmbito da Matemática (*Figura 65*).

A opção de utilizar a Espuma *Weaire-Phelan* como base para o sistema estrutural do Watercube trouxe não só a substituição dos elementos curvilíneos por uma estrutura reticulada, mas, sobretudo, manteve a relação estreita entre a forma da estrutura e o conceito do projeto adotado desde o início. Esse conjunto de poliedros permitiu obter um resultado factível e viável, além

de notoriamente complexo, repetindo os sólidos sequencialmente e manipulando o conjunto a partir de técnicas avançadas de modelagem paramétrica.



a. Conjectura de Kelvin composta por octaedros truncados.

b. Espuma Weaire-Phelan composta por dodecaedros e tetradecaedros.

Figura 65: Discretizações matemáticas para os processos de formação de bolhas de espuma. Fonte: Ilustração nossa.

A estrutura do Watercube foi definida pelo empilhamento dos poliedros da Espuma *Weaire-Phelan*, seguido por operações geométricas de rotação e corte, girando-a e seccionando-a, visando o seu encapsulamento dentro das fachadas. Esse conjunto de poliedros, com mais de cem polígonos não coplanares, foi substituído por perfis estruturais tubulares descrevendo o contorno de todas as arestas. Nos vértices, que são também pontos de encontro dessas arestas, foram estabelecidas conexões com formas e tamanhos variáveis em função de sua posição na estrutura.

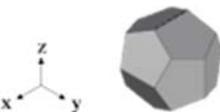
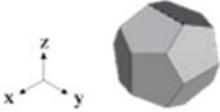
A opção por vedações translúcidas, tanto na fachada como em planos internos, foi a condição essencial para que a estrutura pudesse ser observada pelos usuários do edifício. Superfícies termoplásticas do polímero ETFE, foram utilizadas como vedação em planos externos e internos. Embora sua aparência seja semelhante aos plásticos comuns, a elevada resistência ao calor, à corrosão e ao envelhecimento, em virtude de raios UV, fizeram do ETFE uma solução bem-sucedida no caso do Watercube, representando uma economia de energia elétrica (na iluminação e no resfriamento do edifício) e um alívio de cargas para a estrutura.

5.1.1 Geometria e Estrutura

Um dodecaedro é um sólido de 12 faces planas, cuja versão regular e convexa é um sólido platônico, completamente simétrico, composto por pentágonos regulares. O dodecaedro semirregular apresenta as mesmas propriedades do sólido platônico, o que permite determinar sua área e seu volume por meio das mesmas equações. No entanto, suas faces são compostas

por pentágonos semirregulares de quatro lados iguais e um diferente. Na Espuma *Weaire-Phelan*, o lado diferente está disposto em duas posições distintas: 1) com a aresta superior orientada na direção do eixo x ; 2) com a aresta superior orientada na direção do eixo y , de acordo com o sistema de coordenadas ortogonais XYZ e com as notações X: Leste-Oeste; Y: Sul-Norte e Z: Zênite-Nadir, convencionalmente utilizadas nesta pesquisa (*Quadro 6*).

Quadro 6: Propriedades do dodecaedro utilizado na Estrutura *Weaire-Phelan*.

Dodecaedros	Descrição
	Poliedro convexo, duplamente simétrico, com 20 vértices e 30 arestas (a).
12 pentágonos irregulares	$\text{Área} = 3\sqrt{25 + 10\sqrt{5}a^2} \quad \text{Volume} = \frac{1}{4}(15 + 7\sqrt{5})a^3$
	Posição 1: X Aresta superior na direção X RGB: 255, 0, 0
	Posição 2: Y Aresta superior na direção Y RGB: 255, 0, 0

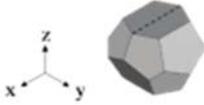
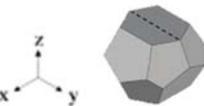
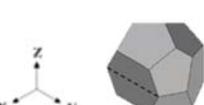
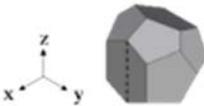
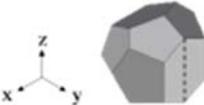
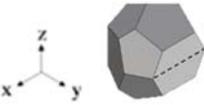
Fonte: ilustração nossa.

A espuma se completa com um tetradecaedro semirregular de 14 faces planas, composto por dois hexágonos semirregulares, oito pentágonos irregulares e quatro pentágonos semirregulares. Os hexágonos são idênticos e opostos, mas um tem o eixo maior orientado em direção ortogonal do maior eixo do outro. Além disso, os pentágonos irregulares, com 5 lados diferentes, e os pentágonos semirregulares, idênticos aos do dodecaedro, completam o sólido. Na Espuma *Weaire-Phelan* os tetradecaedros estão dispostos em seis posições distintas, as quais foram identificadas pelas posições dos hexágonos, de acordo com o sistema de coordenadas ortogonais XYZ e com as notações X: Leste-Oeste; Y: Sul-Norte e Z: Zênite-Nadir, convencionalmente utilizadas nesta pesquisa (*Quadro 7*).

Estes dois tipos de sólidos dispostos em oito posições distintas, dois dodecaedros e seis tetradecaedros, se unem por meio das faces coincidentes e, ao se conectarem, as arestas e vértices também passam a coincidir. Desconsiderando-se os planos, as linhas e os pontos coincidentes, a espuma com oito poliedros produz 196 arestas e 116 vértices e estes números vão sendo elevados a cada adição de um novo poliedro. A partir da repetição desses sólidos,

pode-se gerar associações simétricas ou assimétricas e a exclusão das faces gera um conjunto de linhas de ordem dificilmente identificada.

Quadro 7: Propriedades do tetradecaedro utilizado na Estrutura Weiare-Phelan.

Tetradecaedros	Descrição
	<p>Poliedro convexo, composto por 2 hexágonos, 4 pentágonos semirregulares e 8 pentágonos irregulares; duplamente simétrico, com 24 vértices e 36 arestas (a).</p> <p>Área = $\frac{3a^2}{2}(2\sqrt{3} + \sqrt{45 + 24\sqrt{3}})$ Volume = $a^3 \frac{(2\sqrt{6\sqrt{3}} + \sqrt{24+14\sqrt{3}})}{4}$</p> <p>Raio da circunferência circunscrita = $\frac{(1+\sqrt{3})a}{2} \approx 1.366025 \cdot a$</p>
	<p>Posição 1: Xy Eixos maiores dos hexágonos nas direções X (Zênite) e Y (Nadir) RGB: 255 , 0 , 0</p>
	<p>Posição 2: Yx Eixos maiores dos hexágonos nas direções Y (Zênite) e X (Nadir) RGB: 255 , 0 , 0</p>
	<p>Posição 3: Yz Eixos maiores dos hexágonos nas direções Y (Oeste) e Z (Leste) RGB: 255 , 0 , 0</p>
	<p>Posição 4: Zy Eixos maiores dos hexágonos nas direções Z (Oeste) e Y (Leste) RGB: 255 , 0 , 0</p>
	<p>Posição 5: Zx Eixos maiores dos hexágonos nas direções Z (Sul) e X (Norte) RGB: 255 , 0 , 0</p>
	<p>Posição 6: Xz Eixos maiores dos hexágonos nas direções X (Sul) e Z (Norte) RGB: 255 , 0 , 0</p>

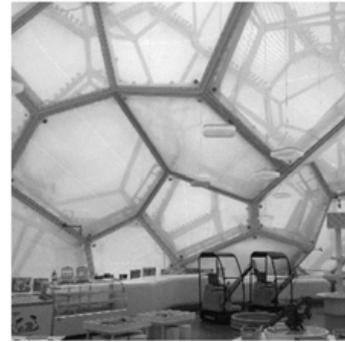
Fonte: Ilustração nossa.

O bloco elementar da estrutura pode ser entendido como essa reunião de oito poliedros, pois as alterações dimensionais efetuadas sobre o bloco implicam mudanças em todo o conjunto. No Watercube, os sólidos possuem faces com tamanhos entre 8 e 13 m² e estas dimensões buscaram equacionar aspectos tanto estruturais quanto produtivos. Com base nessa definição preliminar a dimensão completa da estrutura pôde ser estimada precisamente, assim como as condições de

rigidez e deformação puderam ser testadas. Estabelecidos todos os poliedros, procedimentos de rotação e fatiamento foram efetuadas sobre o conjunto, e o resultado pode ser visualizados em diversos pontos da estrutura do edifício, como no teto da piscina olímpica, ou no ambiente da brinquedoteca (*Figura 66*).



a. Polígonos no teto do ambiente da piscina olímpica, obtidos por meio da seção plana da estrutura.



b. Poliedros nas paredes da brinquedoteca, rotacionados em relação à Espuma Weaire-Phelan original.

Figura 66: Espuma Weaire-Phelan vista nas formas no Watercube. Fonte: Ilustração nossa.

A rotação foi efetuada segundo um eixo diagonal ao conjunto de poliedros, de maneira que a estabilidade estrutural foi sendo estudada de modo gradual. Externamente, estabeleceram-se seis planos: dois horizontais, dois verticais e dois frontais, os quais seccionariam a estrutura, encapsulando-a dentro desse contorno. A rotação e a seção planimétrica externa do conjunto produziram diversos polígonos nos planos secantes do cuboide e estes elementos deram origem às fachadas do edifício.

Os procedimentos computacionais utilizados permitiram que as operações geométricas de rotação, de translação e de escalonamento pudessem ser conjugadas com os processos de otimização estrutural. Assim, análises geralmente efetuadas em etapas posteriores do processo de projeto foram incorporadas aos estágios iniciais da concepção arquitetônica, estabelecendo novas relações entre a criação e o dimensionamento da estrutura. Dentro desse contexto, antigas abordagens do tipo *over-the-wall*, em que os projetos arquitetônico e estrutural possuem uma sequência linear e de transição bem marcada, foram substituídas por modelos baseados em informação, nas quais as diversas disciplinas atuam simultaneamente para o desenvolvimento da solução (*Figura 67*).

Os planos secantes definidos durante o encapsulamento facilitaram a definição de uma hierarquia para os elementos estruturais. Assim, a estrutura pôde ser dividida nos seguintes subsistemas: 1) estrutura periférica externa, ou estrutura de fachada, composta pelos elementos

que pertencem às fachadas; 2) estrutura periférica interna, ou estrutura de paredes internas, composta pelos elementos pertencem aos planos das paredes internas e; 3) estrutura de enchimento, composta pelos elementos entre esses dois planos. Mesmo sendo subsistemas completamente vinculados, essa separação analítica auxilia no entendimento de características desses grupos de elementos.

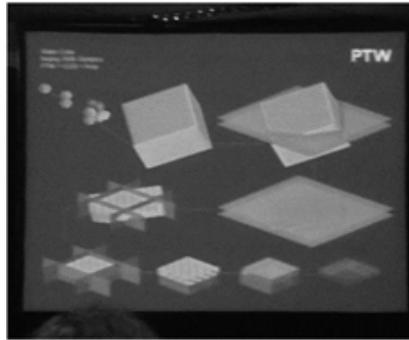


Figura 67: Tela da apresentação de John Bilmon, diretor do escritório PTW Architects, em palestra na Conferência Feicon-Batmat de 2014, mostrando a rotação e o fatiamento da Espuma Weaire-Phelan. Fonte: Ilustração nossa.

A estrutura de fachada compõe-se de um conjunto repetitivo de 16 polígonos, incluindo triângulos, quadriláteros, pentágonos, hexágonos e heptágonos. Os lados desses semiplanos correspondem aos eixos das barras estruturais, produzidas nesse subsistema com perfis tubulares de seção transversal retangular. Nos pontos de encontro desses perfis, onde também se situam os vértices dos polígonos, foram posicionados cilindros para a conexão dos tubos através de sua superfície lateral. No conjunto, cada conexão cilíndrica conecta sempre três barras, com exceção das conexões posicionadas nas extremidades do grande plano retangular (*Figura 68*).

Na fachada, tanto os tubos quanto as conexões estão contidos em um mesmo plano, a fim de que outros perfis leves utilizados para o arremate das vedações fossem fixados nesses elementos. Olhando para a parte interna, algumas das conexões cilíndricas se conectam também com a estrutura de enchimento e, nestas, foram utilizadas também conexões do tipo meia-esferas. As bases dessas meia-esferas foram solidarizadas com as bases dos cilindros, enquanto sua parte esférica conecta os tubos internos, a maioria não-coplanares.

Imediatamente após a estrutura fachada, a estrutura de enchimento utilizou tubos cilíndricos. Embora o aspecto do conjunto tenha a aparência de um emaranhado de barras sem uma ordem identificável, a repetição dos mesmos poliedros tornou sua fabricação relativamente

simples, se comparada a outras estruturas igualmente complexas. Isoladamente, as 12 faces e 30 arestas do dodecaedro produzem somente dois tamanhos diferentes de barras estruturais: 6 barras tamanho A e 24 tamanho B. No tetradecaedro a repetição continua, porém com mais três tamanhos: 4 barras tamanho A, 16 barras tamanho B, 8 barras tamanho C, 4 barras tamanho D e 4 barras tamanho E. O uso de apenas cinco tamanhos diferentes de barras em uma estrutura desse porte e com essa complexidade pode ser considerado praticamente uma standardização.

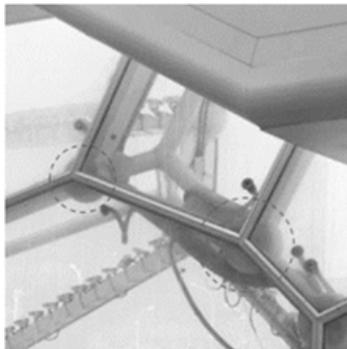


Figura 68: Polígonos produzidos nas fachadas do Watercube. Fonte: Ilustração nossa.

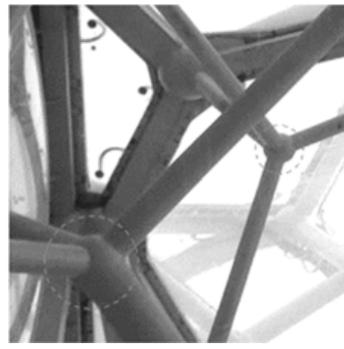
Mesmo com esta repetição, os nós da estrutura de enchimento concentram barras em diferentes inclinações, o que resulta em diferentes condições de solicitação. Em consequência, foram adotadas conexões do tipo ball- shaped, mostradas no Capítulo Três, com diferentes diâmetros produzidas de modo individualizado, cujos os furos funcionam como “esperas” para os tubos. Embora os arquivos digitais viabilizassem a produção das conexões pelos meios digitais, sua fabricação foi efetuada através de métodos tradicionais. Assim, a montagem consistiu em identificar as conexões por posição e unir os tubos, já que estas possuíam, através dos furos, a informação sobre a inclinação das barras.

Na estrutura periférica interna o mesmo raciocínio de planos secantes foi utilizado, o que produziu paredes internas ortogonais em todos os ambientes, com exceção da brinquedoteca, onde as vedações seguiram o contorno das faces dos poliedros. As soluções de conexão e foram as mesmas utilizadas na fachada, porém com as cantoneiras expostas, uma vez que não havia a preocupação com a estanqueidade da vedação. No teto da piscina principal foram utilizados perfis tubulares de maior largura e, neste setor da estrutura, a ideia foi que os elementos formassem um conjunto único, de traçado contínuo, no qual as conexões fossem quase

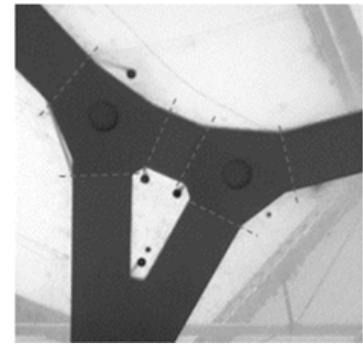
imperceptíveis. Nesse caso, as conexões possuíam formas diversas, com a mesma largura dos tubos, e também conectavam o teto com a estrutura da cobertura (*Figura 69*).



a. Conexões da estrutura periférica externa (repetidas internamente).



b. Variações dos tamanhos na estrutura de enchimento.



c. Conexões internas no teto.

Figura 69: Conexões do Watercube.

As soluções de conexão do Watercube levaram em consideração a durabilidade do edifício, de modo que sua forma não foi exclusivamente definida por questões produtivas e de dimensionamento. Os modelos baseados em informação abriram caminho para que diversas variáveis pudessem ser consideradas na solução, como a estanqueidade das fachadas. Os tipos de conexões diferentes, adaptadas para situações específicas, puderam ser viabilizados de maneira eficiente a partir dos meios digitais de fabricação.

Nesse arranjo estrutural de aproximadamente 22 mil barras e 12 mil conexões, a composição de oito poliedros, com dois dodecaedros e seis tetradecaedros, foi o bloco elementar (*building block*), pois sua manipulação permitia determinar muitas questões relativas à estrutura como um todo. A conjugação entre estes blocos e as duas operações geométricas, de rotação e de fatiamento, possibilitaram estimar algumas condições de solicitação, sem a necessidade de produzir o modelo completo. Da mesma maneira, a seção produzida nos sólidos pelo fatiando do bloco elementar o permitiu obter os polígonos da fachada a partir desse modelo reduzido.

Embora as relações de escala entre o elemento básico de construção e o modelo global da estrutura não permitam uma generalização completamente linear, a abordagem *bottom-up* insere algumas possibilidades no processo de projeto. Nos casos em que a solução estrutural acontece posteriormente à definição da forma, são poucos os conhecimentos sobre estruturas que efetivamente têm relevância nas discussões de projeto. No entanto, a definição de um elemento básico de antemão, mesmo que conceitual, praticamente obriga que alguns

conhecimentos sejam discutidos inicialmente, imaginando a solução futura. No Watercube, os conceitos de forma e estrutura não podem ser desvinculados e, assim, as sequências tradicionais de projeto, nas quais a concepção da forma precede a estrutura, perdem sentido.

5.1.2 Processo alternativo para o design do Watercube

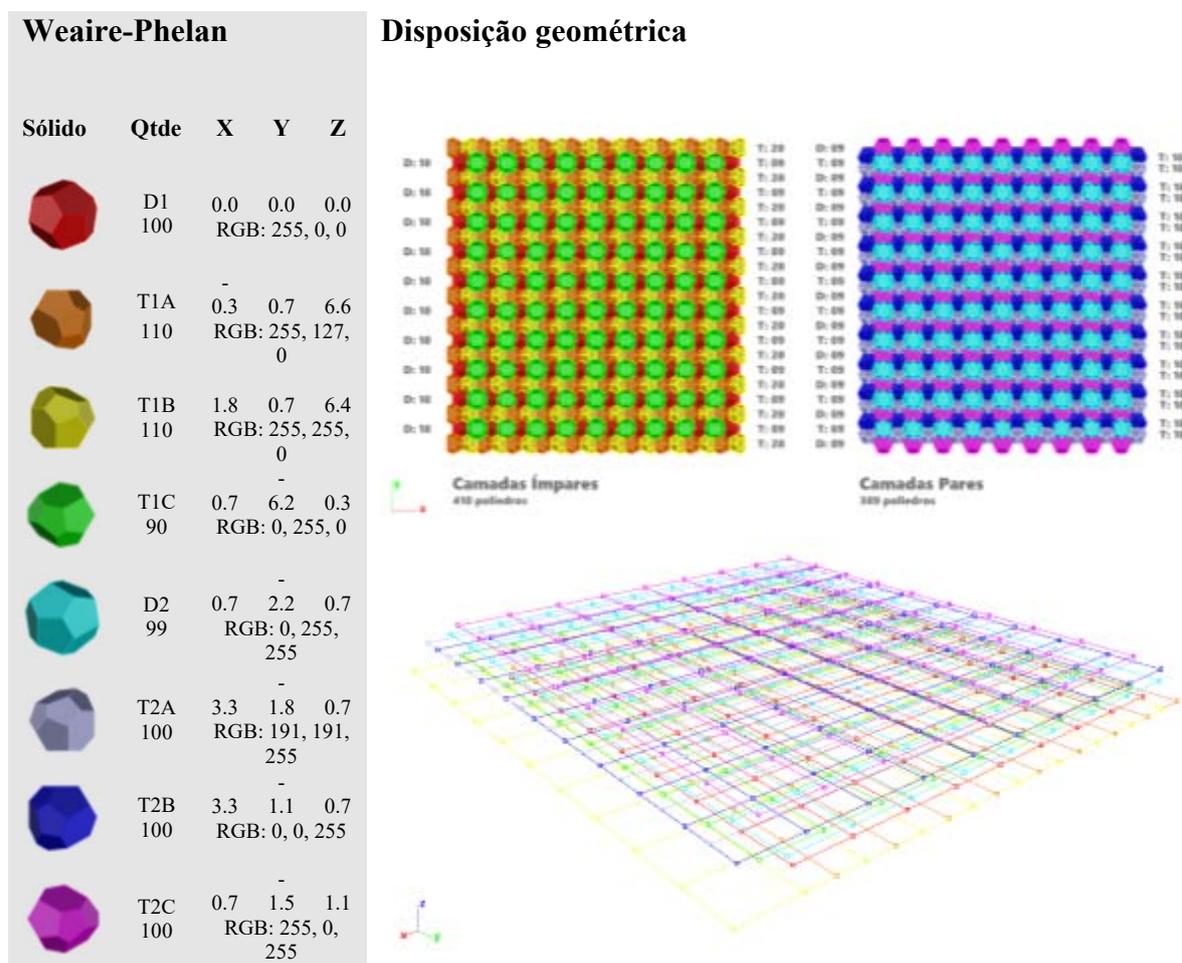
Nesta seção são apresentados experimentos de geração de estruturas tridimensionais que combinam o sistema de empilhamento *Weaire-Phelan* com o método generativo de autômatos celulares. Este experimento teve como objetivo aproximar as estratégias utilizadas no projeto deste edifício com os métodos de projeto que utilizam os sistemas generativos, a fim de explorar limites para a combinação destas duas abordagens.

A estratégia de empilhar blocos elementares pode ser observada em edifícios muito antigos, como é o caso das pirâmides do Egito, e no contexto contemporâneo de produção da Arquitetura ela também tem se mostrado promissora, como no caso do Watercube. As espumas de Kelvin e *Weaire-Phelan* partiram de conjecturas matemáticas discretas e estas últimas têm sido apropriadas por arquitetos ao longo de vários séculos. É incontestável dizer que o caminho percorrido pelos arquitetos ao decidirem se apropriar de uma definição dessa natureza passa por outras variáveis, concretas e abstratas, que compõem um problema de arquitetura. Contudo, no delineamento científico, estas outras variáveis serão colocadas em suspensão, para que possamos avançar em questões sobre como os sistemas generativos *bottom-up* podem atuar na solução dos problemas de concepção do espaço arquitetônico em contextos mais amplos.

No ambiente virtual, os elementos da espuma *Weaire-Phelan* podem ser organizados de diversas maneiras, como tipos e conjuntos de poliedros, ou camadas de colunas ou linhas. Neste processo alternativo individualizou-se cada poliedro com notações sobre tipo, camada da espuma e a sua posição dentro da camada. Os tipos foram identificados pelas letras D de dodecaedro e T de tetradecaedro, este último referenciado ainda pelas letras ABC. A camada foi estabelecida por um conjunto de planos definidos a partir dos centroides dos poliedros e, tendo em vista que a espuma é composta pelos oito poliedros, definiram-se oito planos a partir dos centroides, os quais foram divididos em duas camadas (1 e 2) com quatro planos cada. Cada uma das camadas, que correspondia a um tipo de sólido, foi identificada por cores do padrão RGB e a posição dentro da camada foi referenciada posicionando o centroide mais à direita e mais abaixo do dodecaedro D1 na origem da base XYZ ortogonal do espaço: $P_1D1 = \{0.0, 0.0, 0.0\}$ (*Quadro 8*).

Desse modo, as camadas denominadas de ímpares ficaram definidas pelos poliedros de cores mais “quentes”: vermelho, laranja, amarelo e verde, e as camadas pares, pelas cores mais “frias”: ciano, lilás, azul e magenta. O tamanho de cada uma dessas camadas também foi limitado apenas para fins de experimentação computacional, o que de maneira alguma corresponde a uma limitação das soluções pelo tamanho das camadas. Além disso, na direção do vetor vertical Z, as camadas podem ser sobrepostas indefinidamente, a partir das conexões entre as faces dos poliedros, que é o que dá forma à espuma *Weaire-Phelan*.

Quadro 8: Disposição da Espuma *Weaire-Phelan* em camadas horizontais.



Fonte: Ilustração nossa.

Depois de identificados e definidos os poliedros, investigaram-se técnicas para o desenvolvimento de alguns CA, a fim de reconstruir essa associação de poliedros a partir de regras simples, buscando, principalmente, reproduzir de maneira generativa os métodos de empilhamento. O primeiro passo foi explorar maneiras para vincular os sólidos ao sistema generativo, isto é, definir seus elementos como argumentos para os parâmetros do CA. Conforme se mostrou no Capítulo Dois, as células em geral são espaços vazios, do mesmo

modo que os slots de memória comumente utilizados nos computadores e, assim, a maneira mais direta de se vincular um elemento a um CA é definindo esse elemento como um argumento capaz de preencher as células.

Do ponto de vista geométrico, os argumentos possíveis são: vértices, linhas, superfícies ou o sólido como um todo, além da combinação de partes desses elementos. A vinculação do sólido diretamente ao sistema generativo traz o benefício do controle da geometria, já que todos os procedimentos vão permutar um elemento conhecido. No entanto, a manipulação de vários sólidos com 12 ou 14 superfícies planas torna o processamento computacional demorado. Ao se trabalhar com os CA, esta última premissa tem de ser efetivamente considerada, pois em algumas regras o número de células pode dobrar a cada geração, o que dificulta a manipulação do modelo, mesmo por métodos automatizados.

Desse modo, a alternativa foi utilizar elementos geométricos mais simples e em menor quantidade como argumentos do CA e depois vinculá-los ao sólido por meio de um procedimento de referência. Os centroides atendem a essa necessidade, pois para cada poliedro existe apenas um centroide e, além disso, eles servem como pontos de referência simples, para os quais os poliedros podem ser movidos antes, durante ou depois dos processos de iteração. O complemento a esse procedimento de mover os poliedros a partir de seus respectivos centroides é alinhar esse processo às gerações do autômato, tornando-o também automatizado. Isso pode ser feito por meio de um laço condicional simples, como mostra-se no *Quadro 9*.

Quadro 9: Laço condicional que insere um poliedro sempre que houver uma célula viva (ponto).

Python

Descrição: Movendo um sólido para a posição do centroide

Porção de código

```
import rhinoscriptsyntax as rs

//adicionando a quantidade de centroides
start=rs.AddPoint(0,0,0)
end=rs.AddPoint([10,0,0])
divide=20
vec=rs.VectorCreate(end,start)
vec=rs.VectorDivide(vec,divide)
centerList=list()

// movendo o triângulo para o ponto
for i in range(divide):
    centerList.append(rs.CopyObject(start,newVec))
for center in centerList:
    rs.AddCircle(center,2.0)
```

Fonte: Ilustração nossa.

Desse modo, pode-se definir pontos de coordenadas XYZ do espaço como argumento para as células e, assim, estes pontos podem ser instanciados dentro do CA como base em sua estrutura booleana (*True/False*). Além disso, cada ponto que é na verdade uma referência para seu respectivo tipo de poliedro e ocupa uma única posição na estrutura de dados, o que facilita sua manipulação dentro de estruturas como árvores, *tuplas*, *arrays* ou dicionários. Isso significa que as propriedades de cada poliedro estão individualizadas e qualquer um de seus parâmetros pode ser alterado sem que se altere o conjunto estrutural. Se após uma análise estrutural, por exemplo, se decidir trocar a espessura dos tubos correspondentes a apenas algumas arestas, a operação é feita com poucos procedimentos de modelagem.

Decidida a maneira de argumentar as células dos CA, iniciou-se um procedimento exploratório que visava desenvolver um sistema que permitisse realizar as seguintes tarefas:

- Reproduzir a espuma *Weaire-Phelan* por meio do empilhamento de seus poliedros de maneira automatizada;
- Explorar outras associações espaciais, utilizando os mesmos poliedros;
- Controlar as regras para a geração das estruturas;
- Vincular os procedimentos de rotação de fatiamento ao mecanismo de exploração da forma.

Após investigar alguns métodos capazes de reunir condições para a realização das tarefas pretendidas, optou-se pela utilização dos CA_{1D}. A partir das 256 regras nas condições fundamentais ($k = 2, r = 1$), buscou-se identificar como a combinação dos padrões exibidos nas regras: fixos, periódicos, complexos e caóticos, poderiam permitir a exploração de geometrias diferentes da utilizada no Watercube, a partir dos mesmos blocos de construção. Partindo da ideia do ponto como estado das células, esses padrões constituiriam malhas de pontos, aos quais podiam ser vinculados os poliedros em sua posição correspondente.

O CA_{1D} proposto contém quatro *inputs* essenciais: 1) as entradas dos estados que definem as regras, nas quais podem ser utilizados dados numéricos do tipo chaves booleanas (*true/false*); 2) entrada progressiva de números correspondentes às gerações, em geral séries de números inteiros vinculadas a laços do tipo contadores; 3) entrada da origem da malha de pontos, com base nas posições dos centroides; 4) entrada dos poliedros, nos quais cada tipo é um argumento a ser movido para o lugar de seus respectivos centroides. Além desses procedimentos, outros

considerados secundários foram utilizados com o propósito apenas de ajustes nas escalas dos elementos.

Desse modo, o espaço vai sendo preenchido por uma associação de poliedros que exhibe um padrão geométrico idêntico à regra à qual está vinculado. Contudo, antes, durante ou depois da iteração é possível excluir ou inserir sólidos, produzindo outros arranjos ou gerando espaços na espuma. Em uma primeira análise, é possível explorar um pouco menos de 256 maneiras de preencher o espaço (algumas regras dos CA_{1D} exibem o mesmo padrão gráfico), com a possibilidade inserções e exclusões de elementos, de maneira manual ou automatizada, o que elevaria exponencialmente essa quantidade. Com uma estratégia simples para atrair ou repulsar elementos gráficos com base nas distâncias pode-se, por exemplo, estabelecer espaços que não sejam preenchidos por nenhum poliedro, mantendo a iteração ao redor destes espaços vazios, o que pode ser útil na definição de ambientes em um edifício.

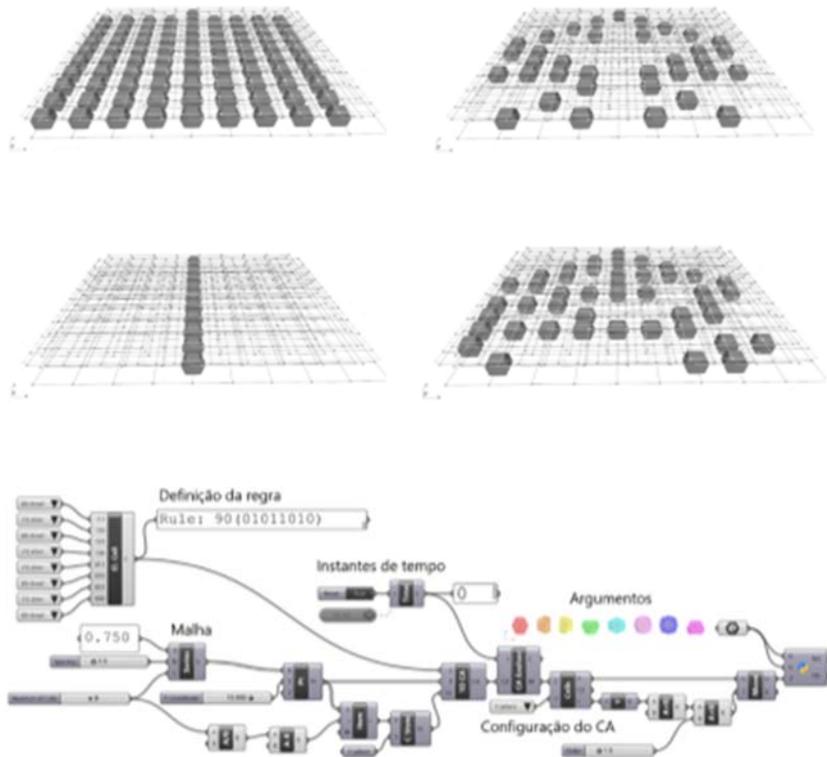
Por enquanto, explorando apenas as regras padrão, pode-se preencher a malha de centroides com todos poliedros da espuma utilizando, por exemplo, a Regra 255 (11111111), que apresenta em sua iteração somente células vivas. Em outros exemplos, é possível explorar configurações que preencham apenas uma ou poucas colunas, como a Regra 4, além de preenchimentos periódicos, como a Regra 90, ou pseudoaleatórios, como a Regra 30 (*Quadro 10*).

Existem algumas maneiras de promover o empilhamento desses elementos e duas delas são promissoras, por combinarem a cadência das gerações com a tarefa de empilhar os sólidos. Na primeira, mecanismos simples como *copy/move* podem ser automatizados pelos mesmos laços do tipo contadores que argumentam as gerações, e o próprio componente *Cells components* fornece um *output* dinâmico, que conta os instantes de tempo. A vinculação desse *output* com as ferramentas do tipo *copy/move* na direção do vetor *z*, permite que os centroides sejam copiados na direção desse vetor *e*, ao se estabelecer como distância para essa cópia as distâncias entre os centroides das camadas, promove-se o empilhamento dos poliedros. Na segunda, utilizam-se os mesmos procedimentos de *copy/move* e altura dos centroides, mas copiando as malhas no lugar dos centroides. Isso permite que em cada camada se tenha um CA_{1D} diferente, gerando outras possibilidades.

Quadro 10: Exploração do empilhamento de poliedros com os autômatos celulares.

Rhinceros 3D

Representação bidimensional de uma das fachadas do Watercube



Fonte: Ilustração nossa.

No caso do Watercube, a primeira estratégia seria a mais adequada, já que se pretende que todos os elementos da espuma *Weaire-Phelan* sejam utilizados na composição dos elementos estruturais. Assim, em um processo alternativo para o design do Watercube, pode-se utilizar a Regra 255 de um CA_{1D} vinculada aos centroides dos poliedros, empilhando-os na direção do vetor z , faltando ainda os procedimentos de rotação e fatiamento. Contudo, essa alternativa apresenta pelo menos duas vantagens em relação aos métodos utilizados na ocasião do projeto: 1) funciona a partir de pontos, que exigem pouco processamento computacional e cujo controle e precisão são aferidos apenas no bloco fundamental inicial; 2) permite a visualização da construção da estrutura de maneira gradual, por meio da cadência das gerações (*Figura 70*).

O procedimento de rotação também pode ser automatizado utilizando parâmetros de argumentos variáveis independentes, isto é, um conjunto de valores de ângulos cuja variação manual pode observada instantaneamente no modelo, ou vinculados aos instantes de tempo dos contadores de geração e, assim, uma opção seria que cada instante equivalesse a um grau de rotação, por exemplo. Uma terceira alternativa, com características mais *bottom-up*, seria utilizar esses procedimentos nos blocos elementares de 8 poliedros e, em sequência, utilizar o

mecanismo de iteração dos autômatos. Em todas as opções os eixos de rotação podem ser definidos seja com parâmetros de argumento estático ou de argumentos variáveis. No caso do Watercube o eixo de rotação foi selecionado a partir de uma linha diagonal à espuma e a rotação foi de aproximadamente 30 graus.

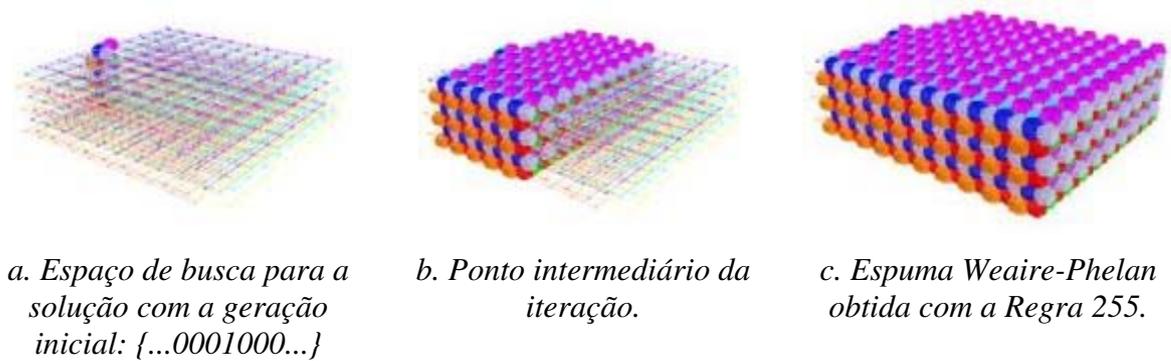


Figura 70: Redesign da estrutura do Watercube a partir de um sistema generativo baseado nos CA_{1D}.

Já o fatiamento por meio de planos é um procedimento, em geral, efetuado *a posteriori*, pois, evidentemente, exige a definição de um elemento externo, como uma superfície de corte. Em geral, define-se a interseção entre elementos tridimensionais; no caso do Watercube, entre os tubos da estrutura e os planos do cuboide. Determinar essa interseção a partir de sólidos simples não requer sofisticação no processo de modelagem, de modo que o seu desenvolvimento posterior é até mais adequado. Seccionar os poliedros enquanto blocos de construção implica em modificar suas propriedades geométricas fundamentais e, em se tratando de uma associação intrincada e de várias superfícies distintas, essa interseção tem de ser pensada preservando condições de encaixe, simetria e escala entre os elementos.

Uma alternativa aos procedimentos de rotação e fatiamento efetuados em uma etapa posterior aos processos de modelagem é a delimitação de um espaço de busca dinâmico, definido a partir de parâmetros não estáticos. A ideia de utilizar pontos como argumento para as células do CA permite que esse espaço de busca seja estabelecido previamente ao processo de iteração do autômato. A mesma noção de *atratores/repulsores* mencionada anteriormente pode ser utilizada como limitador para o espaço de busca, no qual considera-se apenas um conjunto de pontos que atende a uma condição preestabelecida. Não caso específico do fatiamento, esse procedimento não será suficiente, havendo ainda a necessidade de utilização posterior da ferramenta de interseção entre superfícies.

Como exemplo, tomou-se a malha de pontos definida a partir dos centroides dos poliedros fixando-a na origem “O” dos espaços XYZ de coordenadas $O = (0.0, 0.0, 0.0)$ e foram determinadas as distâncias “d” entre O e todos os centroides. Definindo-se uma condição a partir da função $fd < x$, por meio de um laço condicional, pode-se excluir os pontos do conjunto $P_1 = \{d < x\}$, fazendo desse um espaço sem pontos, ou sem elementos estruturais, como um ambiente de um edifício. O mesmo raciocínio pode ser aplicado para um tipo de fatiamento prévio, no qual se selecionam pontos com alguma proximidade a uma superfície pretendida: $P_2 = \{d < y\}$, a qual não precisa ser necessariamente um cubo ou um cuboide. O procedimento se completa com rotação de pontos, estabelecendo um vetor de rotação centrado na origem O, cujo raio pode conter uma variação de números reais entre 0 e 360, correspondente a uma volta de 2π radianos. A partir de qualquer um desses vetores, pode-se girar a malha de pontos antes de se iniciar a iteração com CA, a qual considerará somente os pontos do conjunto: $P_{CA} = \{P_1 - P_2\}$. Na *Figura 71* mostram-se estes procedimentos utilizando-se um cilindro como elemento para o fatiamento, a fim de facilitar a visualização.

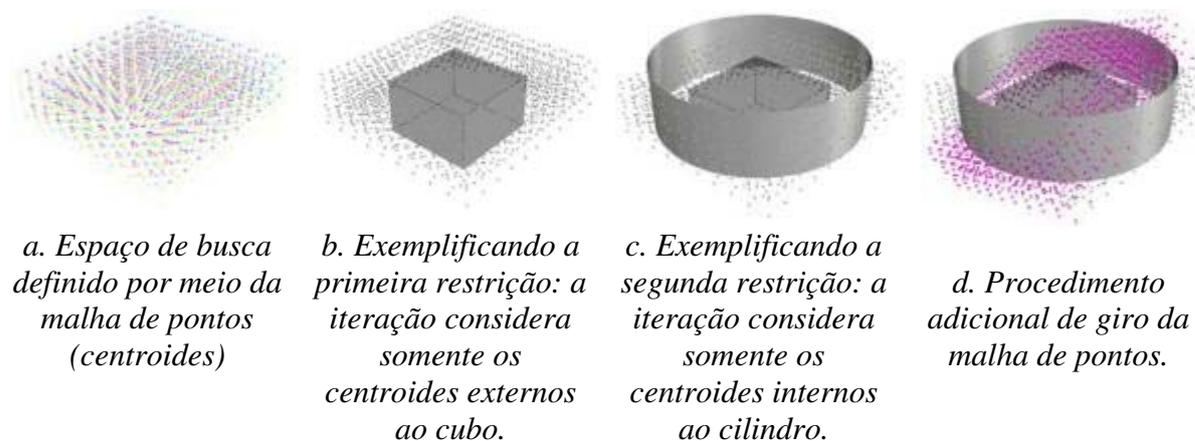


Figura 71: Síntese dos procedimentos utilizados no design do Watercube.

Com base nestes conceitos, buscou-se desenvolver um conjunto de procedimentos algorítmicos para a geração de elementos estruturais a partir da associação de poliedros da espuma *Weaire-Phelan* empilhados com o mecanismo iterativo dos CA. Como uma função-objetivo, definiu-se o pórtico como elemento estrutural a ser obtido, por se tratar de um elemento de simples, de forma global definida e contínuo. Desse modo, estabeleceram-se duas camadas de poliedros similares às mostradas, mas dispostas paralelamente ao plano vertical de projeções XZ, representados por seus respectivos centroides, os quais constituem as células dos CA. Além disso, utilizou-se instruções condicionais para definir a região preenchida pelos poliedros, de

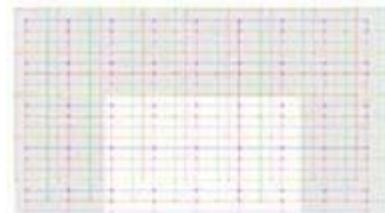
maneira que a iteração acontecesse somente em uma trajetória específica, neste caso, em uma trajetória que os constituísse como pórticos.

A região da malha de centroides em que os poliedros são rejeitados a partir de instruções condicionais constitui o vão do pórtico, neste caso também paramétrico. Essas instruções foram definidas a partir das distâncias dos centroides em relação ao ponto médio da linha inferior da malha. Assim, a partir de uma instrução com saída *booleana* do tipo *True/False*, são considerados centroides apenas com distâncias maiores que d , onde d corresponde ao vão do pórtico. Distâncias diferentes nos sentidos x e z podem ser utilizadas a partir de duas variáveis, com $d_{\text{Horizontal}}$ e d_{Vertical} controlando estas distâncias de maneira independente (*Figura 72*).

Definidas as condições iniciais, o mecanismo de iteração pode ser executado, embora ainda seja necessário observar os fatores relacionados à exequibilidade das estruturas geradas. Com o foco restrito à questão estrutural, foram observados dois fatores visando caracterizar o sistema proposto como um método para o design desse tipo de sistema estrutural. Um deles está relacionado à continuidade dos elementos pois, enquanto pórticos, as barras e as conexões devem estar dispostos em uma sequência, de modo que a transmissão de esforços não fique prejudicada. Outro fator está relacionado à eficiência da estrutura pois, embora as questões de otimização não estejam em pauta neste momento, a relação entre os diferentes desempenhos estruturais pode ser observada dentro do mesmo contexto de ações atuantes nas estruturas.



a. Encaixe de poliedros que determinam as posições dos centroides.



b. Disposição das camadas de espuma Weaire-Phelan com destaque à região de atuação do mecanismo iterativo de CA.

Figura 72: Configurações do mecanismo bottom-up para a geração de pórticos estruturais.

Neste experimento estabeleceu-se uma área de atuação do sistema generativo com $d_{\text{Horizontal}} = 20$ metros e $d_{\text{Vertical}} = 10$ metros, com tolerâncias dimensionais não muito rígidas, isto é, com dimensões de vão flutuando entre estes valores. Essa tolerância poderia ser rigidamente estabelecida a partir do mesmo conceito de fatiamento proposto no Watercube, mas a ideia inicialmente é não descartar soluções, de maneira a não convergir a um objetivo, mas, sim,

produzir várias soluções que gravitem em torno de um objetivo, neste caso, definido pelas dimensões d .

Para cada um dos oito tipos de poliedro foi vinculado um CA_{1D}, a fim de que eles pudessem iterar de modo independente em relação às regras e gerações. Desse modo, a sequência de poliedros mostrados que resultaram em cada pórtico foi formada por diferentes regras em diferentes gerações e, quando essa combinação atinge uma continuidade, ela é aceita como solução para um pórtico contínuo. Essa continuidade pode ser obtida de maneira automatizada, a partir de instruções condicionais vinculadas às distâncias dos centroides, mas em geral a investigação de formas sugere alterar as regras durante o processo iterativo, a fim de observar todos os resultados, inclusive os que não atendem aos pré-requisitos estabelecidos.

A fim de avaliar algumas questões estruturais entre os resultados obtidos, sem de fato buscar estabelecer uma condição de desempenho satisfatória, efetuaram-se algumas análises estruturais utilizando o Método dos Elementos Finitos (FEM) por meio do *add-on* Karamba3D®, que permite realizar análises estruturais simultâneas ao processo de iteração dentro do ambiente de modelagem. Do mesmo modo que no Watercube, a partir do empilhamento de poliedros extraíram-se as arestas e os vértices, que na estrutura tridimensional correspondem ao eixo das barras e ao centro das conexões esféricas respectivamente. Antes de gerar os elementos estruturais, foi necessário utilizar funções do Karamba3D® para a eliminação de linhas e pontos duplicados.

Para a análise do modelo foram necessários cinco procedimentos no Karamba3D®:

- Converter das linhas em barras estruturais (método *lineToBeam*);
- Definir os apoios (método *support*): os mesmos de um pórtico simples bi-engastado;
- Estabelecer as condições de carregamento (método *loads*): cargas de peso próprio com coeficientes de majoração a fim de observar com maior clareza as deformações;
- Definir a seção transversal (método *crossSecSelect*): Ø 73.0 mm; espessura: 3.6 mm;
- Definir o material (método *matSelect*): ASTM A 501, $f_y = 250$ MPa and $f_u = 400$ MPa.

Neste primeiro experimento, buscou-se observar a variabilidade das soluções produzidas, como elas se distanciam ou se aproximam entre si, além das condições de funcionamento do aplicativo de FEM em conjunto com o sistema generativo baseado em CA. No *Quadro 10* são apresentados quatro resultados de pórticos estruturais obtidos a partir dos procedimentos propostos.

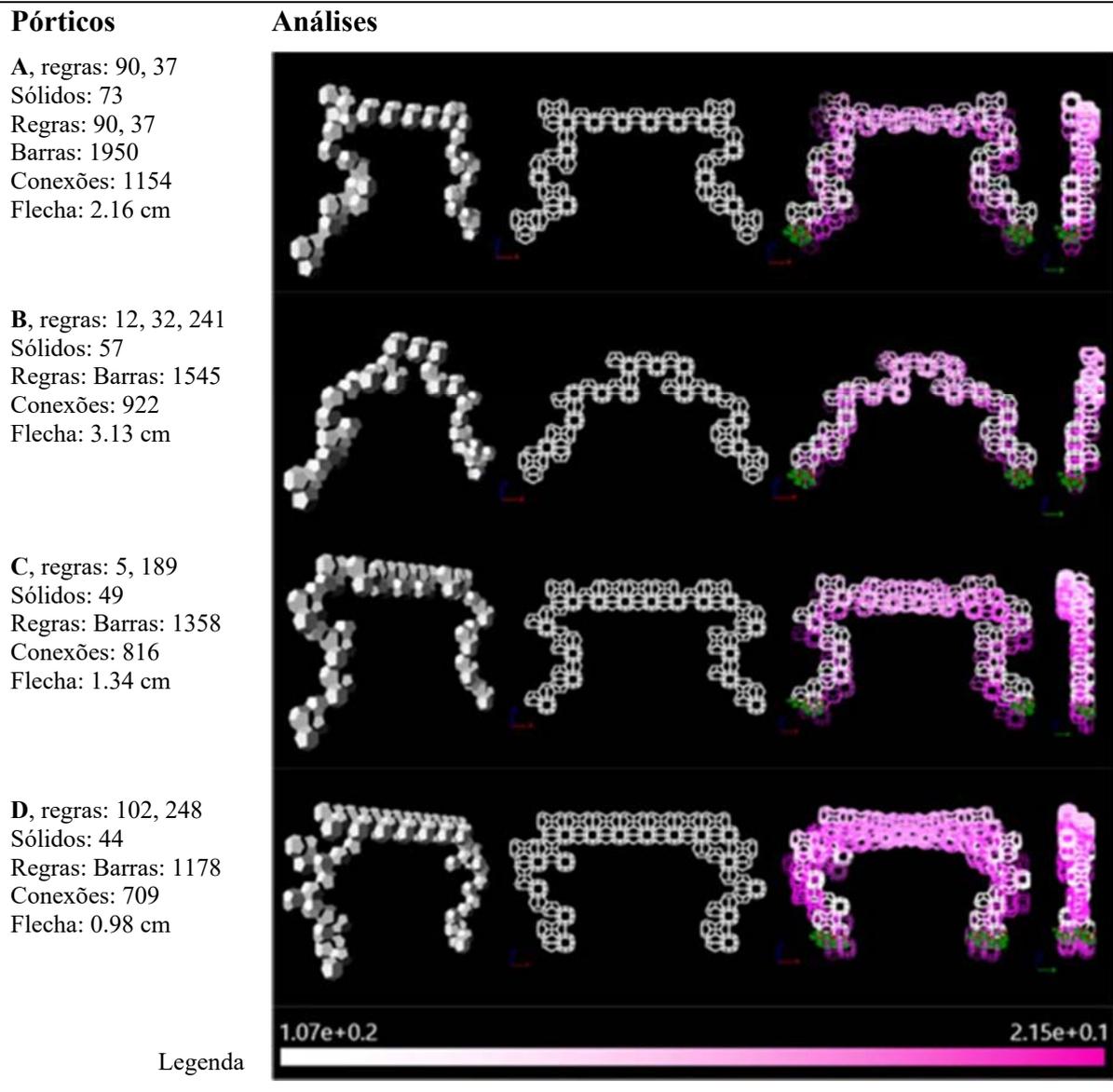
A quantidade de soluções possíveis dentro desse sistema generativo é de difícil estimativa, já que as iterações podem continuar sucessivamente, sem um limite definido e, além disso, o comportamento pseudoaleatório de algumas das regras não permitem estimar seus resultados. No entanto, um espectro de aproximadamente 50 gerações com 10 tipos de regras diversas, produziu os quatro pórticos A, B, C e D com diferentes quantidades de poliedros: $A = 72$; $B = 57$; $C = 49$ e $D = 44$. Evidentemente, estas soluções possuem diferentes níveis de rigidez, além de diferentes níveis de eficiência dentro de um mesmo contexto de ações estruturais.

A concepção de estruturas baseada exclusivamente em questões de desempenho estrutural se fundamenta em aspectos relacionados aos contextos de tensão e rigidez e suas implicações com a estabilidade ou deslocamento da estrutura. Comparando-se os pórticos produzidos dentro desse contexto, o pórtico A não apresenta uma situação muito favorável, pois, embora não demonstre os maiores níveis de deflexão, utiliza um número de elementos muito superior aos demais pórticos. Já o pórtico B tem efetivamente a flecha mais acentuada e, portanto, pode ser considerada a solução mais desfavorável dentre as quatro.

Os pórticos mais promissores, isto é, que teriam mais chances de ser considerados como solução de projeto, em virtude de seu comportamento mecânico, são as soluções C e D, por despenderem menor quantidade de elementos e apresentarem menores deflexões. Nesse caso, a geometria proporcionada pela reunião de elementos é o que as define como mais eficientes, embora somente estes critérios não sejam suficientes para defini-las como mais ou menos adequadas. Outros aspectos poderiam ser considerados ao se compararem estas duas soluções pois, se por um lado a solução D tem a vantagem de despender um menor número de elementos, por outro a solução C propicia uma maior extensão livre ao nível do solo. Além disso, a solução C se aproxima mais da forma de um arco, enquanto a solução D se assemelha mais à ideia de um pórtico com viga reta.

Essas e várias outras questões são constantemente consideradas dentro do processo de projeto de estruturas e ganham ainda mais preponderância quando as mesmas participam da solução de projeto enquanto elemento formal. Talvez em uma comparação entre os pórticos B e D, a opção pelo pórtico D seria mais natural, uma vez que as formas dos dois são conceitualmente semelhantes, mas a última implica em uma solução estruturalmente mais eficiente que a primeira. Certamente, este é um traço distintivo desse método de obtenção da forma pois, dentro um número muito elevado de possibilidades, pode-se obter duas ou mais soluções de mesma natureza formal, mas de comportamentos mecânicos bem distintos.

Quadro 11: Pórticos estruturais obtidos com a aplicação dos CA à Espuma Weaire-Phelan.



Fonte: Autor.

5.2 FEDSQUARE

O centenário da federalização dos estados australianos foi marcado pela construção de um espaço cívico no centro da cidade de Melbourne, batizado de Federation Square (*Quadro 12*). O projeto abrangeu uma área de 45.000 m², que corresponde a mais ou menos a um quarteirão, abrigando nove edifícios culturais e empresariais. O Átrio Norte tem a forma de uma caixa envidraçada de aproximadamente 90 metros de comprimento por 17 metros de largura, sustentada por uma estrutura de grande complexidade com uma altura de 15 metros. A proposta do escritório Lab Studio Architects, em parceria com os escritórios Hyder Consulting, Atelier

One e Bonacci Group, baseou-se na ideia do encontro de pessoas de diferentes nacionalidades que acontece no local, traduzindo essa complexidade de relações por meio de um ícone também complexo e coerente com os outros edifícios da praça.

Quadro 12: Ficha técnica do Fedsquare.

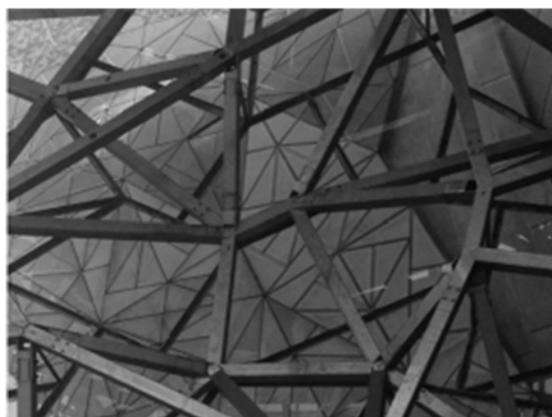
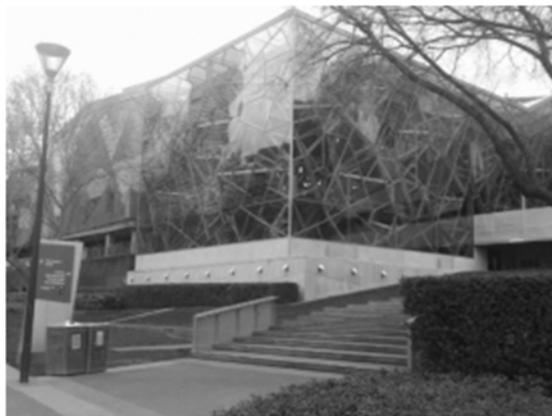
**Átrio Norte da Praça da Federação,
Austrália 1998–2002**

Título original:
North Atrium of Federation Square

Cliente:
Governo do Estado de Victoria

Arquitetura
Lab Architecture Studio Diretor e associados: Donald Battes, Peter Davidson, Atillio Terragni Equipe de projeto: David Racz, Shibolet Schecter, Marco Logatti, Alvaro Conti, Miki Ando

Engenharia Estrutural Hyder Consulting
Pat Strickland, Stu Jones, Ken McLeod
Atelier One
Neil Thomas, Dirk Zimmermann, Carolina Bartram, Scobie Alvis, Wayne Sanderson, Anil Hira, Andy Watts, Aran Chadwick Bonacci Group
Steve Paynee Roger Sykes



Fonte: Ilustração nossa.

Nesse contexto, no qual o edifício Átrio Norte do Fedsquare buscou reproduzir a confusão da interação de pessoas e de culturas, os arquitetos buscaram inspiração em uma malha triangular similar à de um cata-vento, em que um conjunto de triângulos se orienta segundo diferentes direções. A ideia foi utilizar uma noção fractal que promovia formas auto similares em diversas escalas, de maneira que os triângulos se mantivessem com a mesma proporção mesmo dentro de uma estrutura aparentemente caótica (DE JONG, 2004).

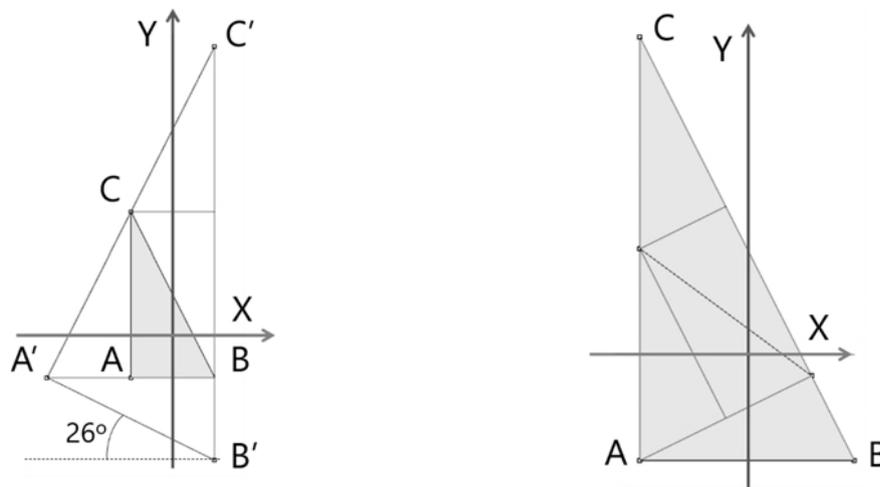
Essa ideia foi proposta em outros edifícios da praça, como na paginação para as fachadas dos outros edifícios, e consiste de uma divisão planimétrica a partir da aplicação de uma regra sobre um triângulo retângulo padrão, em uma dada posição do plano cartesiano. Essa mesma divisão já havia sido proposta pelo matemático inglês John Conway, autor do CA_{2D} Jogo da Vida,

apresentado no Capítulo Dois. Da mesma maneira que nesta programação de autômatos celulares, a partir de regras muito simples pode-se produzir um padrão muito complexo também com o padrão de triângulos. A partir da multiplicação de um polinômio por três pontos cartesianos correspondentes aos vértices de um triângulo é possível produzir outros quatro triângulos de proporções idênticas às do triângulo original.

A questão é que estes cinco triângulos, isto é, o triângulo original mais os quatro triângulos resultantes da multiplicação, se organizam conjuntamente no mesmo plano cartesiano, ficando com os lados justapostos formando um triângulo maior. Este tem também as mesmas proporções dos outros cinco triângulos, mas com os lados ligeiramente girados em relação à inclinação dos lados do triângulo original, pouco mais de 26° , que corresponde ao valor do ângulo agudo dos triângulos. A aplicação sucessiva dessa multiplicação simula um processo em que o triângulo original se “infla” até o triângulo maior, isto é, cresce os lados proporcionalmente, ao mesmo tempo em que “roda”, como as aletas de um catavento. Evidentemente, a multiplicação inversa subdividirá o triângulo em cinco triângulos menores de mesma proporção (GARDNER, 1977).

Para a obtenção desse processo de autossimilaridade, do tipo geometria fractal, Conway posicionou o triângulo retângulo ABC com lados medindo 1, 2 e $\sqrt{5}$ nos vértices de coordenadas cartesianas XY: $A = (-0.5, -0.5)$; $B = (0.5, -0.5)$ e $C = (-0.5, 1.5)$, multiplicou estas matrizes 2×1 pelo polinômio descrito pela matriz 2×2 : $\begin{pmatrix} 2 & -1 \end{pmatrix}$ e obteve os vértices do triângulo maior $A'B'C'$: $A' = (-1.5, -0.5)$; $B' = (0.5, -1.5)$ e $C' = (0.5, 3.5)$. Essa maneira dinâmica de preencher o espaço com subdivisões recebeu o nome de *Pinwheel Tiling* (Figura 73).

Enquanto nos outros edifícios da praça a operação *Pinwheel Tiling* foi aplicada como uma forma de divisão para o plano das fachadas, no átrio do Fedsquare sua utilização foi consideravelmente distinta. Tendo em vista que este método foi desenvolvido com vistas a uma divisão planimétrica, a estrutura tridimensional pretendida para o Fedsquare exigiria alguma reformulação dessa geometria, a fim de obter elementos não coplanares. A solução proposta pelos escritórios foi estabelecer um plano decomposto pela paginação de Cata-ventos, subtraindo algumas arestas da composição, a fim de produzir armações aparentemente irregulares na estrutura, mas sempre utilizando os lados do mesmo triângulo.



a. “Inflando” o triângulo inicial em outros cinco triângulos iguais, agrupados em um triângulo maior, de mesma proporção.

b. Subdividindo o triângulo inicial em cinco triângulos de mesma proporção agrupados dentro do triângulo inicial.

Figura 73: Processo de autossimilaridade Pinwheel Tiling.

A estrutura do Átrio Norte foi obtida empregando operações geométricas nessas armações estruturais, que consistiram basicamente em girar os lados do triângulo segundo arcos não coplanares ao plano da armação. Outras armações foram dispostas paralelamente à primeira, com os lados rotacionados estabelecendo uma conexão entre eles, de modo a garantir uma continuidade entre os elementos. Os lados do triângulo foram representados por perfis tubulares de seção retangular e nos pontos de encontro entre esses perfis, que são também os vértices dos triângulos, foram estabelecidas conexões semirrígidas do tipo parafusadas.

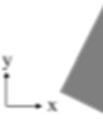
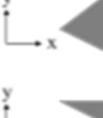
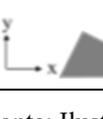
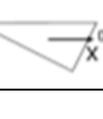
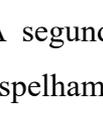
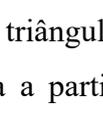
A estrutura foi encapsulada dentro de um prisma de vidro, produzindo uma fachada composta por polígonos aparentemente irregulares, a maioria trapézios e triângulos, nos quais também foram posicionadas algumas esquadrias fixas e móveis. A vedação em vidro temperado verde permite a observação da estrutura tanto do exterior quanto internamente e, no interior, a estrutura funciona como uma grande escultura, podendo ser observada e tocada em diversas áreas. A luz do sol que refratada através do vidro passa também pelo emaranhado de barras, formando faixas de luz e sombra em diversas direções nos pisos e, nos dias ensolarados, essa iluminação descontínua reduz o efeito da radiação direta, ao mesmo tempo em que dispensa a iluminação artificial.

5.2.1 Geometria e Estrutura

O estudo da estrutura do Fedsquare permitiu esmiuçar o sistema estrutural em subsistemas, identificando grupos de triângulos compostos pelo triângulo inicial de lados proporcionais a 1,

2 e $\sqrt{5}$. Identificaram-se duas associações, cada uma contendo cinco triângulos orientados em diferentes direções. Cada associação é o resultado de uma divisão da operação *Pinwheel Tiling* (nota) e, desse modo, a proporção do conjunto também é a mesma dos triângulos menores. Esse conjunto que dá forma ao triângulo maior tem a base orientada na direção X e a altura orientada na direção Z, de acordo com o sistema de coordenadas ortogonais XYZ e com as notações X: Leste-Oeste; Y: Sul-Norte e Z: Zênite-Nadir, convencionalmente utilizadas nesta pesquisa (Quadro 13).

Quadro 13: Primeira associação de triângulos utilizando Pinwheel Tiling.

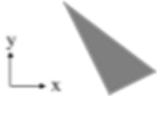
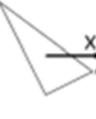
Triângulos	Descrição
	<p>Disposição com 10 triângulos retângulos iguais em 6 posições diferentes, cujos lados têm as proporções: $l_1 = 1$; $l_2 = 2$; $l_3 = \sqrt{5}$. Área = $\frac{(l_1 \cdot l_2)}{2}$ Ângulos: $l_1 \wedge l_2 = 90^\circ$; $l_1 \wedge l_3 = 63.43^\circ$; $l_1 \wedge l_3 = 26.57^\circ$ Raio da circunferência circunscrita = $\frac{l_3}{2}$</p>
	 <p>Posição A1 Ângulo entre a mediatriz da hipotenusa e o eixo X: 90.00</p>
	 <p>Posição A2 Ângulo entre a mediatriz da hipotenusa e o eixo X: 90.00</p>
	 <p>Posição A3 Ângulo entre a mediatriz da hipotenusa e o eixo X: 36.87</p>
	 <p>Posição A4 Ângulo entre a mediatriz da hipotenusa e o eixo X: 36.87</p>
	 <p>Posição A5 Ângulo entre a mediatriz da hipotenusa e o eixo X: 90.00</p>
	 <p>Posição A6 Ângulo entre a mediatriz da hipotenusa e o eixo X: 90.00</p>

Fonte: Ilustração nossa.

A segunda associação de triângulos é semelhante a primeira e foi definida efetuando um espelhamento desta última a partir de sua hipotenusa. Assim, as associações são iguais e inversas, cada uma contendo cinco triângulos, os quais se constituem como pares em espelho. Essa correspondência foi identificada utilizando a notação linha ('), de modo que o triângulo na posição A tivesse como correspondente a posição A'. Na segunda associação, o conjunto que dá forma ao triângulo maior também tem a base orientada na direção X e a altura orientada

na direção Z, de acordo com o sistema de coordenadas ortogonais XYZ e com as notações X: Leste-Oeste; Y: Sul-Norte e Z: Zênite-Nadir, convencionalmente utilizadas nesta pesquisa ().

Quadro 14: Segunda associação de triângulos utilizando Pinwheel Tiling.

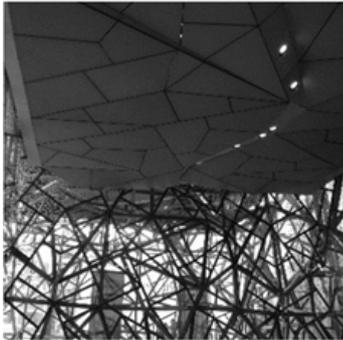
Triângulos	Descrição
	<p>Triângulo retângulo, cujos lados têm as proporções: $l_1 = 1$; $l_2 = 2$; $l_3 = \sqrt{5}$. Área = $\frac{(l_1 \cdot l_2)}{2}$ Ângulos: $l_1 \wedge l_2 = 90^\circ$; $l_1 \wedge l_3 = 63.43^\circ$; $l_1 \wedge l_3 = 26.57^\circ$ Raio da circunferência circunscrita = $\frac{l_3}{2}$</p>
	 <p>Posição B1 Ângulo entre a mediatriz da hipotenusa e o eixo X: 90.00</p>
	 <p>Posição B2 Ângulo entre a mediatriz da hipotenusa e o eixo X: 90.00</p>
	 <p>Posição B3 Ângulo entre a mediatriz da hipotenusa e o eixo X: 36.87</p>
	 <p>Posição B4 Ângulo entre a mediatriz da hipotenusa e o eixo X: 36.87</p>
	 <p>Posição B5 Ângulo entre a mediatriz da hipotenusa e o eixo X: 0.00</p>
	 <p>Posição B6 Ângulo entre a mediatriz da hipotenusa e o eixo X: 0.00</p>

Fonte: Ilustração nossa.

Nos edifícios ao longo da praça, esses conjuntos de triângulos serviram como uma paginação para as fachadas, nos quais alguns grupos de triângulos foram destacados por meio de cores. Nas fachadas envidraçadas do Fedsquare o contorno dos triângulos foi demarcado por perfis leves de seção T, nos quais as mesas serviram de suporte para os planos de vidro. Na fachada frontal do edifício, que dá acesso à avenida principal, foram utilizados 294 triângulos e, após a exclusão dos lados de vários deles, gerou-se diversos polígonos na fachada, incluindo quadriláteros e pentágonos, além dos triângulos restantes.

O bloco elementar da estrutura do Fedsquare é o triângulo elementar, resultado da última subdivisão utilizando a Construção *Pinwheel Tiling*, que tem dimensões iguais a 106, 212, 230 mm. Este triângulo foi utilizado para a definição das fachadas e planos internos e o método utilizado consistiu em estabelecer um conjunto desses triângulos, orientados em diferentes

direções, ajustando-os dentro dos planos. Definido o conjunto, os lados dos triângulos foram sucessivamente sendo excluídos, com o intuito de produzir outros polígonos, de modo a obter um conjunto de formas aparentemente aleatórias, mas com dimensões proporcionais às do triângulo elementar. Esse conceito pode ser observado com mais facilidade no teto do átrio e em painéis decorativos internos ().



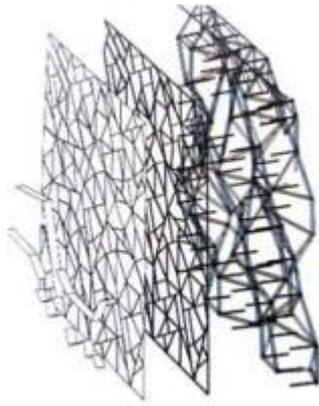
a. Polígonos subdividindo os planos do teto.



b. Painéis separando alguns conjuntos de triângulos por cores e com alguns triângulos suprimidos do conjunto.

Figura 74: Construção Pinwheel Tiling nos elementos do Fedsquare.

A mesma camada que deu origem à fachada foi replicada em um plano interno paralelo, imediatamente após o primeiro e utilizando o mesmo arranjo retangular, mas, neste caso, outros triângulos foram excluídos formando um arranjo de polígonos diferente, alguns deles coincidentes aos da fachada, outros não. Os contornos desses polígonos foram demarcados por perfis estruturais tubulares de seção retangular e a sobreposição das duas camadas gerou um emaranhado de formas planas nas fachadas. A terceira camada, também efetuada com os mesmos perfis estruturais da primeira, utilizou o mesmo princípio de exclusão de lados a partir de um arranjo retangular. Contudo, além da exclusão, o procedimento foi incrementado por uma rotação nas arestas dos polígonos restantes, a fim de produzir planos não coplanares. O resultado da conexão entre essas três camadas gerou uma estrutura aparentemente aleatória, em que a construção *Pinwheel Tiling* é o fundamento, mas praticamente imperceptível (*Figura 75*).



a. Esquema mostrando as camadas estruturais do edifício.



b. Protótipo da camada interna mostrando o giro e a exclusão de barras.

Figura 75: Estratégias de projeto utilizadas no átrio Norte do edifício do Fedsquare.
Fonte: Burry e Burry (2012).

Neste caso, a fachada foi projetada a priori e a tridimensionalidade da estrutura foi obtida pelos processos de replicação paralela das camadas (*offset*) combinados com processos de exclusão e rotação de elementos. Assim, a estrutura periférica da “caixa de vidro” e, conseqüentemente, sua forma de “caixa” foram estabelecidas anteriormente à produção de uma estrutura tridimensional e os dois procedimentos subsequentes foram os incrementos que propiciaram gerar o seu aspecto complexo. Incluindo-se novamente as barras apagadas da solução é possível observar a obtenção da fachada por um conjunto de elementos rigorosamente iguais (Figura 76).

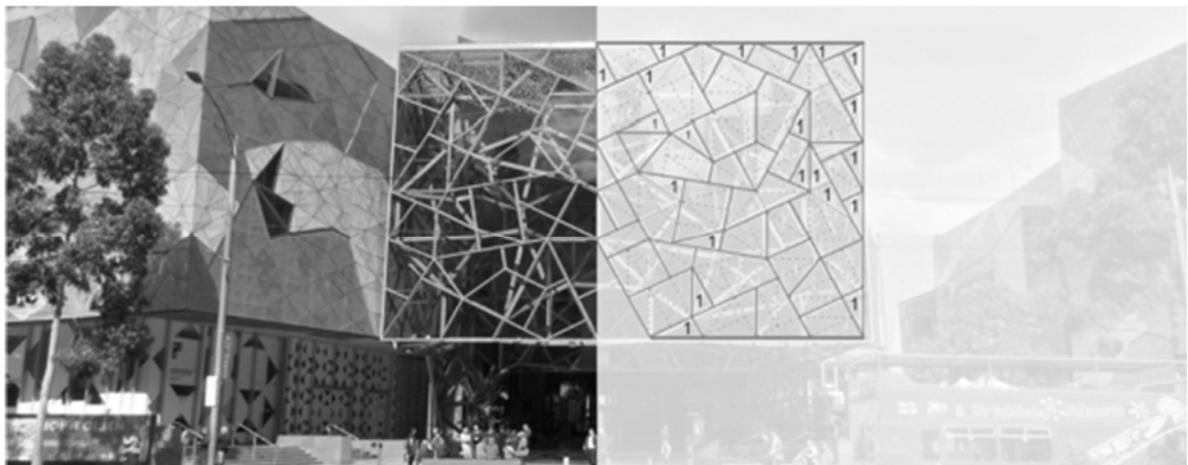


Figura 76: Polígonos produzidos nas fachadas do Átrio Norte com o algarismo 1 indicando a presença de um triângulo elementar. Fonte: imagem e ilustração.

Um dos exemplos mais simples que ilustra o procedimento de exclusão é a geração do retângulo a partir de dois triângulos justapostos por uma hipotenusa coincidente, a qual, quando apagada,

produz um retângulo de 106 mm x 212 mm. Embora esse procedimento produza um número menor de polígonos, isso não simplifica a solução, já que produz pontos para onde convergem diferentes quantidades de barras e, conseqüentemente, diferentes níveis de concentração de tensões. Por esse motivo, foram utilizadas conexões soldadas e parafusadas, que variam de acordo com a posição do nó dentro da estrutura. Além disso, foi necessário estabelecer elementos para a conexão das camadas, não completamente rígidos, a fim de não transmitir esforços da fachada para os elementos estruturais internos.

As barras conectoras entre as camadas da estrutura do Fedsquare estabelecem uma separação do sistema estrutural em subsistemas com algum grau de independência. Em geral, essas barras permitem o movimento dentro do plano horizontal (XY), mas impedem o movimento nos planos vertical (XZ) e lateral (YZ), o que permite a desvinculação dos elementos da fachada para com os elementos estruturais internos, ao mesmo tempo em que confere apoios ao plano das fachadas, contra ações atuantes nesse plano. Desse modo, as barras conectoras funcionam como contraventamentos, estabilizando lateralmente a estrutura, mas, internamente, permitem minimizar a transferência de esforços entre as duas subestruturas.

No ambiente de projeto, as operações de exclusão e rotação de elementos, além de inserção das barras conectoras, foram efetuadas a partir da noção de geometria associativa, na qual se procura estabelecer uma relação condicional entre os elementos geométricos. Desse modo, a condição estabelecida foi manter os vértices da fachada fixos, isto é, impedidos de se movimentar segundo quaisquer direções enquanto os elementos internos poderiam ser progressivamente alterados, de acordo com o resultado de análises estruturais. Assim, as barras da estrutura interna puderam ser movimentadas e alteradas, a fim de determinar posições mais favoráveis para as mesmas.

Por conta de algumas questões funcionais, a estrutura recebeu uma quarta camada em alguns locais, como no auditório, visando estabelecer paredes internas ortogonais. Essa camada foi produzida de modo similar à fachada, também com perfis leves do tipo cantoneira, com revestimento em vidro. No auditório, essa camada foi estendida até o teto, produzindo os mesmos polígonos, mas revestidos com material acusticamente eficiente. Além disso, no plano do teto foram demarcados semiplanos menores em diferentes alturas, a fim de melhorar aspectos relativos à reverberação no ambiente interno.

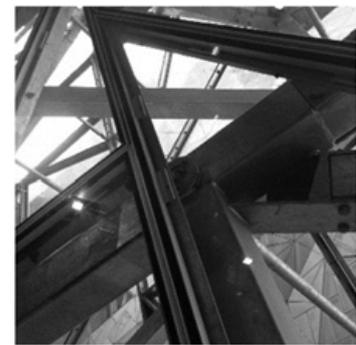
Pois promovem alternativas diferentes para situações de projeto diferentes, sem, contudo, perder de vista a racionalidade da solução. A solução em aço, mantendo proporções e racionalidade dimensional, conferiu um caráter industrial à solução, permitindo que a estrutura fosse quase que exclusivamente pré-fabricada, sendo simplesmente montada no local. Isso também pode ser observado nas conexões, tanto soldadas quanto parafusadas, que utilizaram os mesmos processos de dobra, solda e furação dos perfis estruturais, adequando-as aos mesmos métodos produtivos. Embora a estrutura não dependa de um elevado número de conexões, os seus tipos foram definidos visando explorar funcionalidades, como a transmissão ou não de esforços solicitantes ao longo da estrutura (*Figura 77*).



a. Conexões da estrutura periférica externa.



b. Diferentes tipos de conexões no mesmo em um mesmo vértice da estrutura de enchimento.



c. Conexões da estrutura periférica interna.

Figura 77: Conexões do Fedsquare. Fonte: Ilustração nossa.

Em síntese, a composição fractal proposta na Operação *Pinwheel Tiling* explorada ao longo das fachadas dos edifícios da praça foi utilizada no átrio como um bloco elementar da estrutura, do qual suas predefinições influenciavam todas as definições subsequentes da mesma. A autosimilaridade obtida por meio dessa definição fractal foi traduzida pela proporcionalidade dos elementos, que dispostos segundo camadas promovem uma estrutura tridimensional de rara complexidade, cujo fundamento é planimétrico, simples e repetitivo. É justamente essa simplificação que permite obter facilmente camadas iguais, no sentido de partirem do mesmo arranjo de triângulos, porém diferentes, por escolherem quais deles farão parte da definição.

Embora a associação do modelo plano com o tridimensional não seja facilmente identificada, é possível perceber a relação da estrutura do átrio com as fachadas dos outros edifícios da praça. De maneira mais abstrata, as formas poligonais possuem lados e ângulos iguais ou proporcionais aos do triângulo elementar e isso pode ser percebido ao longo do edifício. A diferença aqui é a utilização da definição matemática como um mecanismo *bottom-up*, cuja

complexidade surge pela maneira de manipular o mesmo bloco elementar, que, mesmo sendo padronizado, permite produzir tanto formas planas e simples, como tridimensionais e complexas.

5.2.2 Processo alternativo para o design do Fedsquare.

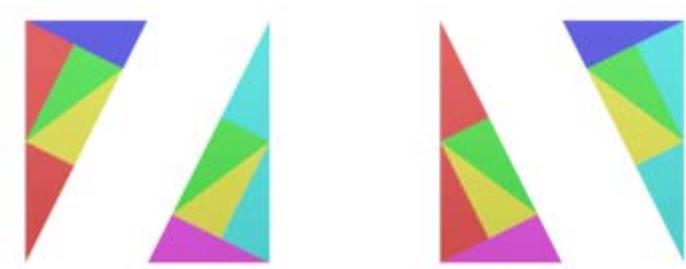
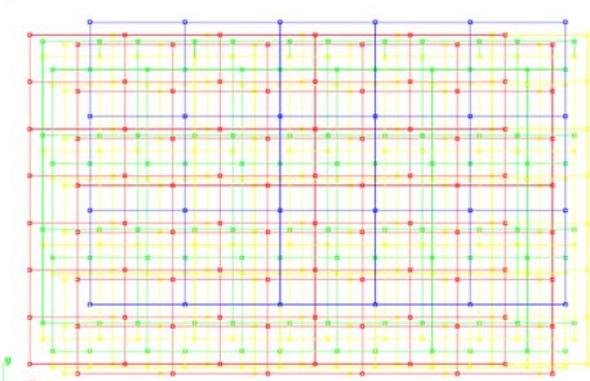
Nesta seção são apresentados experimentos de geração de estruturas tridimensionais que combinam o sistema de divisão do Fedsquare com o método generativo de autômatos celulares. Este experimento teve como objetivo aproximar as estratégias utilizadas no projeto deste edifício com os métodos de projeto que utilizam os sistemas generativos, a fim de explorar limites para a combinação destas duas abordagens.

A estratégia de dividir planos a partir da permutação de elementos padronizados, isto é, passando de uma ordem de sucessão de elementos para outra ordem de sucessão, foi utilizada em diversos planos de edifícios antigos, como os templos da Cidade Proibida, em Pequim, construídos durante as antigas dinastias chinesas. A divisão planimétrica proposta por meio da operação *Pinwheel Tiling* constitui um ramo da matemática o qual se dedica a estudar as raízes conceituais dos fractais, que contém muitas situações que não podem ser facilmente delineadas pelos conceitos da geometria clássica, mas foram exploradas em outros contextos, como na Ciência da Computação. A Regra 90, que produz efeitos de autossimilaridade é um dos exemplos de exploração da noção fractal, dentro do contexto dos CA, de explorações predominantemente computacionais.

No ambiente virtual, os triângulos de proporções 1, 2 e $\sqrt{5}$ obtidos pela operação *Pinwheel Tiling* podem ser organizados em diversas posições, de modo que seu agrupamento pode assumir diversas formas, desde paralelogramos, como no retângulo utilizado no Fedsquare, como formas planimétricas compostas por diversas arestas. Neste experimento utilizou-se as associações gráficas mostradas, que juntas possuem 10 triângulos posicionados em diferentes direções e, conjuntamente, podem produzir diversos tipos de divisão planimétrica. As duas associações foram organizadas a partir do padrão de cores RGB, em que cada cor representa um triângulo das duas associações, identificados também por nomenclaturas em virtude de sua posição. A partir dessa divisão, estabeleceram-se os centroides dos triângulos, de modo que qualquer disposição geométrica das associações pudesse ser representada por uma malha de pontos.

Nos triângulos da Associação 1, no qual a base se orienta na direção X e a altura se orienta na direção Z, foram utilizadas as cores “quentes”, enquanto que na Associação 2, com base e altura orientadas nas direções Z e X, respectivamente, foram utilizadas as cores “frias”. A malha de triângulos pode ser obtida misturando essas associações a partir de operações geométricas usuais do tipo copy/move ou espelhamento (*mirror*), que podem produzir diferentes arranjos de triângulos no plano. A representação desse arranjo de triângulos a partir de seus respectivos centroides utiliza a mesma correspondência de cores, o que permite identificar facilmente o triângulo a partir de seu ponto correspondente (*Quadro 15*).

Quadro 15: Disposições da construção Pinwheel Tiling em dois arranjos distintos.

Paginação de Cata-ventos					Disposição geométrica	
Triângulo	tipo	X	Y	Z		
	A	0.13	0.0	0.40		
		0.13		1.40		
		RGB: 255, 0, 0				
	B	0.40		0.53		
		0.60	0.0	1.13		
		RGB: 255, 255, 0				
	C	0.40		0.86		
		0.60	0.0	1.46		
		RGB: 0, 255, 0				
	D	0.86		0.60		
		0.86	0.0	1.60		
		RGB: 0, 255, 255				
	E	0.40	0.0	1.86		
		RGB: 0, 0, 255				
	F	0.60	0.0	1.33		
		RGB: 255, 0, 255				

Fonte: Ilustração nossa.

Estabelecida essa malha, este estudo buscou investigar métodos computacionais capazes de reconstruir os procedimentos utilizados no Fedsquare para a manipulação desse arranjo plano de triângulos. Estes procedimentos podem ser divididos fundamentalmente em três grupos: 1) estabelecer o conjunto de triângulos; 2) excluir, de modo aleatório, algumas arestas, a fim de produzir uma diversidade de polígonos; 3) girar os lados dos triângulos de modo a obter formas não coplanares. Além disso, outros procedimentos como copiar e mover utilizados na obtenção

das camadas da estrutura, podem ser considerados secundários dentro da abordagem *bottom-up*, pois são efetuados posteriormente à definição do conjunto.

Os possíveis argumentos gráficos que podem ser extraídos do arranjo de triângulos são, além dos centroides, os lados: base, altura e hipotenusa, ou os ângulos: agudo, obtuso e reto. Mais uma vez, a utilização dos pontos como argumentos mostra-se uma estratégia mais eficiente, pelo menos do ponto de vista de processamento computacional, uma vez que os mesmos podem ser representados por listas de valores contento as referências cartesianas XYZ sobre as suas posições dentro do arranjo. Além disso, os pontos podem conter outras referências, relacionadas aos outros argumentos gráficos.

Optando, portanto, por uma modelagem baseada em elementos gráficos, utilizou-se a mesma sintaxe de laço condicional, a fim de mover os triângulos para a posição de seus respectivos centroides após a definição dos lados a serem excluídos. Contudo, diferentemente das regras observadas no CA1D, nas quais as configurações gráficas são obtidas sucessivamente a partir do empilhamento de gerações, aqui se fez necessário um mecanismo capaz de gerar diferentes configurações gráficas no mesmo plano e, a partir delas, vincular a definição condicional às células vivas, e de substituí-las por triângulos (*Quadro 16*).

Quadro 16: Laço condicional que insere um triângulo sempre que houver uma célula viva.

Python

Descrição: Movendo o plano para a posição do centróide

Porção de código

```
import rhinoscriptsyntax as rs

//adicionando a quantidade de centroides
start=rs.AddPoint(0,0,0)
end=rs.AddPoint([10,0,0])
divide=20

vec=rs.VectorCreate(end,start)
vec=rs.VectorDivide(vec,divide)
centerList=list()

// movendo o triângulo para o ponto
for i in range(divide):
    centerList.append(rs.CopyObject(start,newVec))
for center in centerList:
    rs.AddCircle(center,2.0)
```

Fonte: Ilustração nossa.

A malha de pontos representa um plano preenchido com triângulos e, desse modo, a alteração da disposição de pontos na malha altera a maneira como o plano será preenchido. Cada ponto está referenciado aos três lados de seu triângulo correspondente, mas a sua alocação em uma árvore de dados permite que cada lado seja manipulado isoladamente, a partir da seleção dos argumentos na estrutura de dados. Alocando os argumentos gráficos do triângulo nas posições

base = {0}, altura {1} e hipotenusa = {2}, o centroide número 23 pode ter sua base identificada pelo caminho {22; 0}, lembrando que este centroide está referenciado a um dos oito tipos de triângulos da construção *Pinwheel Tiling*. Isso permite que os lados sejam excluídos da disposição sem que se exclua completamente o triângulo. Do mesmo modo que no caso anterior, após decidida a maneira de argumentar as células dos CA, iniciou-se um procedimento exploratório para desenvolvimento de um sistema capaz de realizar as seguintes tarefas:

- Reproduzir os procedimentos de inflar e subdividir a construção *Pinwheel Tiling* de maneira automatizada;
- Explorar outras malhas de triângulos diferentes usando o triângulo elementar;
- Controlar as regras para a geração das estruturas;
- Vincular os procedimentos de exclusão e inclusão de elementos gráficos ao mecanismo de exploração da forma.

Após investigar alguns métodos capazes de reunir condições para a realização das tarefas pretendidas, optou-se pela utilização das regras do CA_{2D} Jogo da Vida, simulando os mecanismos de inclusão e exclusão de lados do triângulo a partir das regras de morte, nascimento e êxtase. Partindo da ideia do ponto como estado das células, foi possível investigar como o processo de interação constrói disposições diferentes ao longo das gerações e como os elementos gráficos são vinculados a esse sistema generativo.

Tal como no Jogo da Vida padrão, os inputs essenciais desse CA_{2D} são as gerações iniciais de pontos. No entanto, as posições desses pontos são definidas a partir da disposição de triângulos estabelecida a priori. Depois de estabelecidos os dois blocos elementares como os mostrados delineados cada um por um triângulo contendo uma divisão da construção *Pinwheel Tiling*, pode-se definir inúmeras gerações iniciais de pontos e cada uma delas pode ser alocada na memória em formato de lista, cada lista contendo um conjunto de pontos (centroides) referenciados por suas posições XY. Cada uma das posições dessa lista corresponde a go do CA_{2D} e sua troca pode ser efetuada por uma lista de valores.

A iteração pode ser obtida por meio de um contador automático, mas, neste caso, a observação das gerações pode ser um processo frutífero para a investigação da forma. Durante o processo pode-se observar não só a formação pseudoaleatória de polígonos, como a quantidade de lados e a continuidade dos elementos. O passo seguinte foi identificar as gerações iniciais que produzem as diferentes formas de vida: invariantes, osciladores, estáticas, etc. e vincular

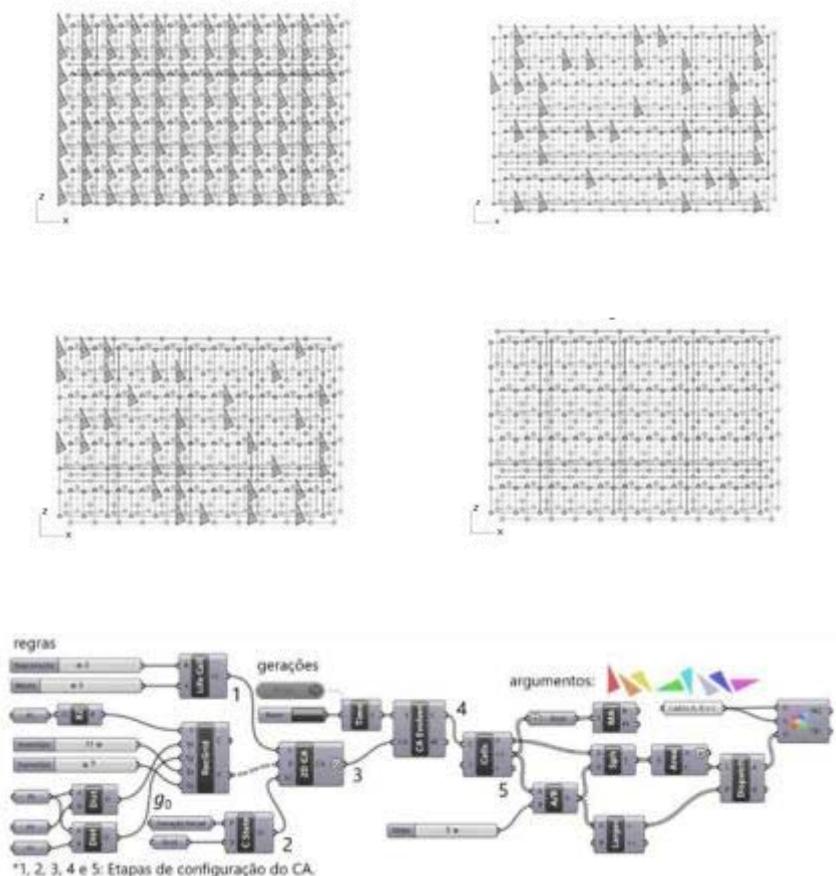
cada uma delas a um tipo de triângulo. Desse modo, foi possível prever parcialmente o comportamento do autômato, isto é, saber quando cada tipo de triângulo irá “surgir” no plano, mesmo sem ter ideia do efeito conjunto.

Espalhando as formas de vida entre os oito tipos de triângulos obtém-se em poucas gerações uma variedade de armações estruturais, contendo quantidades diferentes de triângulos e cuja disposição no plano também pode variar, algumas com mais triângulos nas extremidades, outras com o centro mais povoado (*Quadro 17*).

Quadro 17: Exploração de diferentes configurações de triângulos com o sistema generativo proposto.

Rhinoceros 3D

Representação bidimensional de uma das fachadas do Fedsquare



Fonte: Ilustração nossa.

Existem algumas maneiras de reproduzir a aleatoriedade utilizada no Fedsquare, ao se definirem quais lados dos triângulos serão excluídos. Utilizar gerações iniciais que produzem uma disposição de pontos diferente a cada geração é um mecanismo que pode ser utilizado para este fim, desde que observada a continuidade de elementos. Por outro lado, a utilização de formas de vida de comportamento conhecido, como os osciladores, que alternam entre duas ou

três disposições diferentes entre si, permite maior controle sobre a disposição que está sendo produzida. Além disso, cada conjunto de triângulos é automatizado por meio de um CA_{2D} individualizado, o que permite a adoção de formas de vida diferentes para cada tipo de triângulo. Assim como na situação anterior, o output foi vinculado à ferramenta que move os triângulos a partir de seus centroides para as posições dos pontos correspondentes.

Nesse primeiro experimento, estabeleceu-se uma malha retangular de 24 x 16 m, simétrica e repetitiva, a partir das associações de triângulos utilizadas no Fedsquare. Definidos os centroides, a malha de pontos iniciou o processo de iteração com três regras: 1) morte: dois vizinhos; 2) nascimento: três vizinhos e 3) êxtase: qualquer outra quantidade de vizinhos. As formas de vida utilizadas buscaram manter o contorno retangular, portanto, formas invariantes nos triângulos das extremidades: triângulos vermelhos, verdes e magenta. As demais cores utilizaram formas de vida aleatórias. Depois da iteração algumas estratégias foram empregadas a partir da noção de formas de vida.

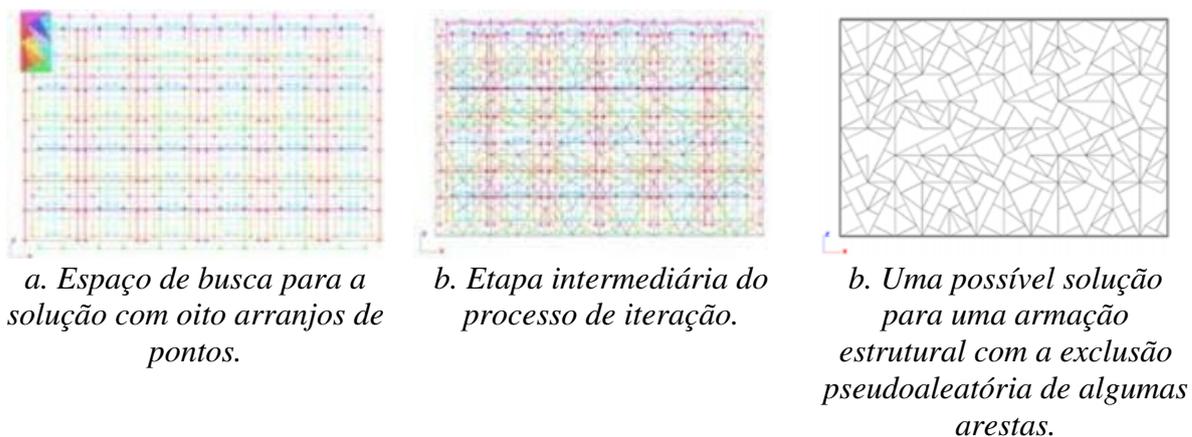


Figura 78: Reprodução da estratégia utilizada no Fedsquare a partir de um sistema generativo baseado nos CA_{2D} .

O procedimento de rotação de barras efetuado na camada mais interior da estrutura do Fedquare é passível de ser reproduzido utilizando os CA, mas esse é um processo dispendioso, já que os ângulos de rotação das barras são variáveis e não foram definidos a partir de uma relação mútua. Por outro lado, procedimentos que envolvem a modelagem paramétrica podem aprimorar os métodos de investigação da forma estrutural quando combinados com um sistema generativo. A alternativa explorada neste experimento buscou definir de maneira paramétrica pontos fixos e variáveis, isto é, que permitem a rotação, nas barras dessas dessa camada. Desse modo, pode-se estabelecer uma coleção de ângulos variando entre 0 e 90°, por exemplo, a fim de pesquisar os ângulos de rotação mais apropriados em relação a qualquer aspecto.

A partir de barras paralelas ao piso foram definidas as ligações entre as camadas, buscando as posições mais apropriadas para a inserção das mesmas. No entanto, justamente nos pontos de inserção das barras de ligação, algumas barras da estrutura podem ter sido apagadas pelo processo de exclusão. Essa dificuldade foi superada selecionando os pontos de inserção de maneira posterior ou anterior ao processo de interação e, no último caso, impedindo a exclusão de algumas barras antes do início do processo de iteração. A ação de impedir a exclusão de barras geralmente é entendida em termos computacionais como uma condição do tipo *if*, mas no Jogo da Vida ela pode ser explorada também a partir das formas de vida invariantes, isto é, que não se excluem em nenhuma geração posterior à inicial (g_0). Utilizando qualquer um dos dois procedimentos é possível garantir que os pontos de inserção das barras de ligação estejam fixos independentemente dos processos de iteração, o que pode ser estendido até a última camada da estrutura, se o conceito do mesmo CA for utilizado em todas elas. Na última camada, esses também seriam pontos fixos, isto é, que não permitem a rotação.

Portanto, a exploração da forma estrutural do Fedsquare a partir do mecanismo *bottom-up* proposto passa pelas tarefas de 1) definir uma geração inicial (g_0) que corresponde a uma malha de pontos (centroides) obtida a partir de uma associação inicial de triângulos que utiliza a construção *Pinwheel Tiling*; 2) iterar o CA, a fim de obter arranjos pseudoaleatórios de triângulos ao longo de suas gerações; 3) selecionar os arranjos a serem utilizados como camadas da estrutura, por exemplo, utilizando as mesmas regras e selecionando as gerações $g_n =$ primeira cada, g_{n+x} e g_{n+y} , onde n , x e y são números naturais que representam gerações do Jogo da Vida; 4) pesquisar os ângulos das barras da última camada, a partir de procedimentos paramétricos. Essas quatro tarefas permitem obter estruturas talvez não idênticas à do Fedsquare, mas similares e com os mesmos níveis de complexidade.

Da mesma maneira que no experimento anterior, buscou-se investigar possíveis aplicações do conceito identificado no estudo de caso, utilizando pórticos estruturais como uma função-objetivo para essa sequência algorítmica de tarefas. Neste caso, estabeleceram-se três camadas paralelas de pontos obtidas a partir do mesmo arranjo de triângulos utilizados. As ligações entre essas camadas foram definidas de maneira anterior, utilizando regras que dão origem a formas de vida invariantes nos triângulos das posições T1A e T2A, identificados respectivamente pelas cores vermelho e ciano. Nas demais cores foram utilizadas regras associadas a formas de vida que produziram disposições diversas, excluindo triângulos e lados de maneira pseudoaleatória. Além disso, como efetuado anteriormente, utilizou-se instruções condicionais para definir a

região preenchida pelos triângulos, de maneira que a iteração acontecesse somente em uma trajetória específica, neste caso, em uma trajetória que os constituísse como pórticos.

Também aqui, as distâncias d_{Vertical} e $d_{\text{Horizontal}}$ dos centroides em relação ao ponto médio e as saídas booleanas do tipo True/False foram utilizadas para definir a região válida de triângulos, que os configura com a forma de um pórtico. Assim, este elemento estrutural seria constituído por duas camadas paralelas de polígonos, além de uma terceira camada, na qual os polígonos não são coplanares, em função da rotação das barras. O elemento se completa pela ligação das camadas por meio das barras de ligação estabelecidas antes do processo de iteração (*Figura 79*).

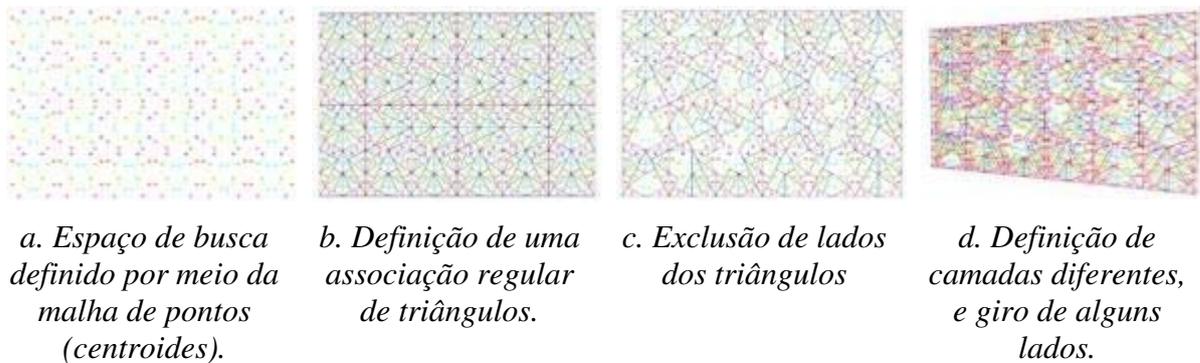


Figura 79: Síntese dos procedimentos utilizados no Fedsquare.

Também neste experimento, buscou-se observar aspectos relacionados à exequibilidade das estruturas durante os processos de iteração. Contudo, da mesma maneira que outros métodos de concepção estrutural que partem de elementos como linhas e nós, questões ligadas à continuidade de barras tem menor preponderância neste caso, pois dentro do conceito da construção *Pinwheel Tiling*, os triângulos acabam sempre conectados. Isso faz com que as soluções geradas a partir deste método não sejam tão díspares, pelos menos com relação à forma final das estruturas. Mesmo assim, buscou-se comparar os diferentes desempenhos estruturais dentro do mesmo contexto de ações atuantes nas estruturas (*Figura 80*).

Da mesma maneira que na anterior, estabeleceu-se uma área de atuação do sistema generativo com $d_{\text{Horizontal}} = 20$ metros e $d_{\text{Vertical}} = 10$ metros, mas nesse caso, as tolerâncias dimensionais puderam ser tomadas com alguma exatidão, uma vez que os blocos elementares definidos tinham a forma de um retângulo. Foram estabelecidas duas camadas paralelas no eixo y , de iteração independente, ligadas a barras ortogonais, tornando os pórticos tridimensionais. Além disso, os banzos inferior e superior sugeriram sempre linhas paralelas em relação ao eixo z , mesmo que intercaladas por algum lado do triângulo excluído pelo autômato. Assim, neste caso,

a ideia de geração de múltiplas soluções está mais ligada às configurações estruturais interiores ao contorno da estrutura, do que à forma global do elemento estrutural.



a. Encaixe de triângulos que determinam as posições dos centroides.

b. Disposição dos planos da construção Pinwheel Tiling com destaque para a região de atuação do mecanismo iterativo de CA.

Figura 80: Configurações do mecanismo bottom-up para a geração de pórticos estruturais.

Para cada um dos oito tipos de triângulos foi vinculada uma regra de CA2D, de modo que a exclusão de triângulos e arestas pudesse ocorrer de maneira independente. Contudo, todos os grupos de triângulos iteraram a mesma regra dentro da vizinhança de Moore, com a próxima geração determinada pelo número de vizinhos da seguinte maneira: morte (m), $0 \leq m < 2$; $6 \leq m < 8$; nascimento (n), $2 \leq n < 3$; êxtase (e): $4 \leq n \leq 5$, sendo a quantidade de vizinhos um número natural. Definidas estas regras, a exploração da forma dos pórticos consistiu em alterar as gerações iniciais do CA, o que promovia a exclusão de diferentes elementos.

Desse modo, o grupo de linhas poderia ser igual ou diferente, em virtude da adoção de gerações iniciais iguais ou diferentes. As mesmas análises de FEM por meio do add-on Karamba3D® foram efetuadas também com o intuito de comparar eficiências, simulando condições durante o processo de iteração. Contudo, buscou-se observar efeitos mais internos à forma global da estrutura e de que maneira as diferentes configurações de barras poderiam influenciar na eficiência do conjunto. Aqui também, antes de gerar os elementos estruturais, foi necessário utilizar funções do Karamba3D® para a eliminação de linhas e pontos duplicados.

A sequência de procedimentos utilizada no Karamba3D® foi a mesma do primeiro experimento:

- Converter as linhas em barras estruturais (método *lineToBeam*);
- Definir os apoios (método *support*): os mesmos de um pórtico simples bi-engastado;

- Estabelecer as condições de carregamento (método *loads*): cargas de peso próprio com coeficientes de majoração a fim de observar com maior clareza as deformações;
- Definir a seção transversal (método *crossSecSelect*): \varnothing 73.0 mm; espessura: 3.6 mm;
- Definir o material (método *matSelect*): ASTM A 501, $f_y = 250$ MPa and $f_u = 400$ MPa.

Neste caso, as soluções se aproximaram mais dos pórticos convencionais, já que o princípio de concepção do elemento se baseia em barras, tal como nas treliças convencionais do tipo Pratt, Howe ou Warren. Ainda assim, é possível ver algumas diferenças capazes de orientar o uso dos CA para fins de concepção estrutural. No *Quadro 18* mostram-se quatro resultados de pórticos estruturais obtidos com os procedimentos propostos.

Quadro 18: Pórticos estruturais obtidos a partir das aplicações com CA e Pinwheel Tiling.

Pórticos	Análises
<p>P1 Comprimento: 34.1 m Nós: 403 Barras: 801 Flecha: 0.9 cm</p>	
<p>P2 Comprimento: 32.7 m Nós: 405 Barras: 841 Flecha: 2.7 cm</p>	
<p>P3 Comprimento: 33.3 m Nós: 399 Barras: 827 Flecha: 1.1 cm</p>	
<p>P4 Comprimento: 30.1 m Nós: 405 Barras: 841 Flecha: 0.7 cm</p>	
<p>Legenda</p>	<p>1.07e+0.2 2.15e+0.1</p>

A quantidade de soluções produzidas depende das formas de vida que cada geração inicial é capaz de produzir. Em linhas gerais, pode-se dizer que, a partir das malhas utilizadas, as gerações iniciais que produzem configurações aparentemente aleatórias geram entre 150 e 200 gerações antes de se estabilizar. Na malha vermelha dos triângulos T1A, por exemplo, que tem 96 centroides (células), as gerações iniciais pseudoaleatórias iniciam-se com um valor de 45 a 60 células espalhadas na malha da maneira escolhida pelo projetista. Formas de vida que produzem poucas gerações foram evitadas, por não permitirem muitas possibilidades. A utilização, por exemplo, das 96 células vivas da malha T1A como sua g_0 excluiria imediatamente todos os elementos, já que as células se enquadrariam na regra de morte. No entanto, algumas estratégias como a utilização de formas de vida invariantes nos triângulos das bordas podem ser adotadas, a fim de manter a forma global do conjunto.

Diferentemente do caso anterior, neste caso os pórticos possuem quantidade de elementos semelhantes, em medida linear, com valores variando entre 30 e 35 metros. Como se pode observar, o pórtico P2 apresenta uma barra descontínua, isto é, que não é bi apoiada, o que comprometeu a solução em termos estruturais. Mas essa solução foi mantida, justamente porque é uma solução formal muito próxima do pórtico P3 e, caso fosse adotado um pequeno ajuste, como a inserção de apenas uma barra, essa alternativa teria níveis de deformação compatíveis com os outros candidatos a solução de projeto. Esse fato é importante, pois, ao se argumentarem linhas, problemas desse tipo são passíveis de existência, fato que não ocorre quando os argumentos são os poliedros, por exemplo.

Do ponto de vista estrutural, mesmo a alternativa P4 sendo a mais eficiente dentro do contexto de solicitações adotado, não existem grandes disparidades em termo de estabilidade entre esta solução e as soluções P1 e P3. Desse modo, este tipo de modelagem produz soluções parecidas, e, de fato, o que sugere a complexidade na estrutura do Fedsquare está relacionado à repetição de armações estruturais com barras dispostas em posições diferentes, mas com aspecto geral semelhante e dispostas em camadas paralelas. Tal como os pórticos, os desempenhos estruturais dessas armações provavelmente não têm grandes disparidades entre si, desde que se mantenham a continuidade dos elementos.

O procedimento de giro das barras tornando-as não coplanares não foi automatizado neste experimento, assim como não o foi no projeto original. Contudo, essa rotação, definida no caso do Fedsquare sem um propósito funcional claramente especificado, confere mais complexidade à solução. Isso significa dizer que, mesmo partindo da ideia da combinação sucessiva de blocos

elementares padronizados, os procedimentos não previstos por um sistema generativo podem ter grande impacto na solução final, mesmo que sejam, de algum modo, desvinculados da ideia generativa de produção de alternativas, mas, de outro, conectadas a ela por meio das intenções de projeto.

Capítulo Seis

Design estrutural bottom-up



A necessidade das mutações que originam uma forma ideal é mais importante do que a própria forma ideal.”

———— GREG LYNN, 1998

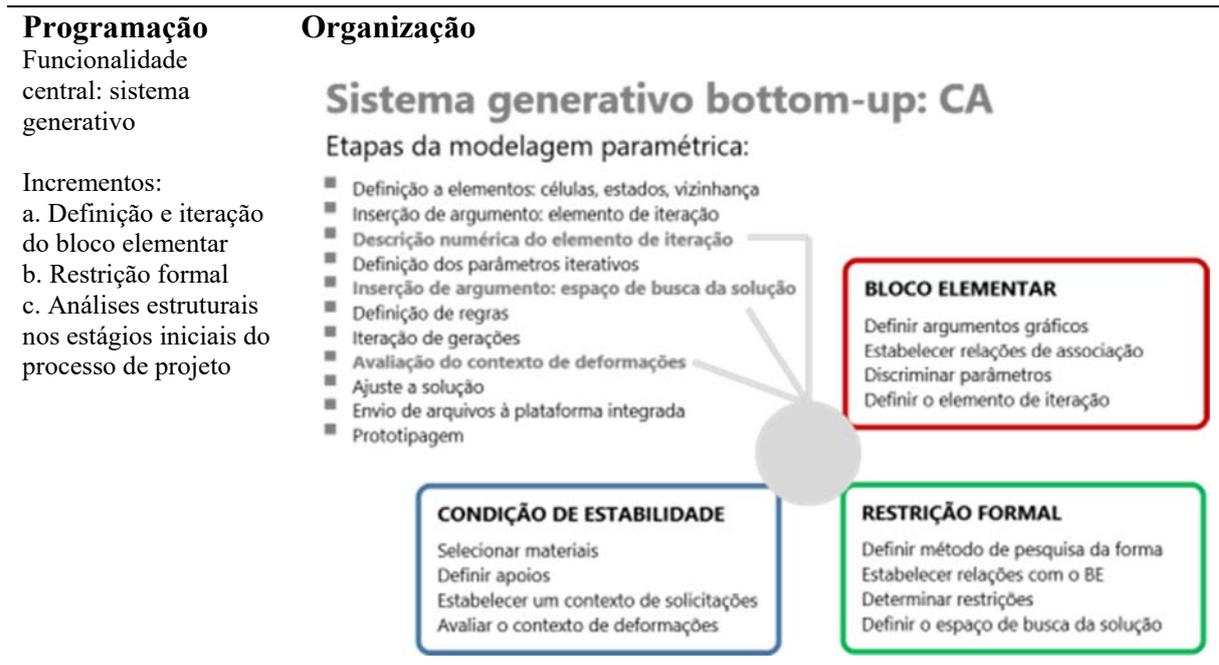
Ao comentar o texto de Jacques Derrida: Edmund Husserl's origem of Geometry – an introduction, de 1962.

Com base na experiência dos estudos de caso, formulou-se um conjunto de procedimentos para a geração de estruturas complexas, utilizando a combinação de blocos elementares por meio do mecanismo iterativo dos autômatos celulares. Neste experimento exploratório, estabeleceram-se procedimentos para a investigação de possíveis sistemas estruturais dentro do contexto dos sistemas generativos de projeto. A partir de procedimentos que envolveram rotinas computacionais de programação, foi proposto um sistema com características *bottom-up* com três funções que compreendem a geração, a análise e a modelagem de estruturas reticuladas tridimensionais: 1) iteração do bloco elementar; 2) restrições ligadas à forma e; 3) análises de condições de estabilidade no contexto da modelagem paramétrica (*Quadro 19*).

A partir da revisão de literatura, elementos geométricos foram combinados utilizando o mecanismo iterativo dos autômatos celulares como método de exploração de alternativas para o design estrutural *bottom-up*. Nesta pesquisa, tem se buscado alternativas para o design estrutural nas situações em que existe uma intenção explícita de gerar estruturas complexas,

com um número elevado de elementos. Com esse propósito, o sistema proposto teve como objetivos principais gerar e alterar sistemas estruturais a partir da associação de blocos elementares até os níveis em que sua relação com a estrutura global se torne mais difícil de ser identificada. Além dos CA, outros sistemas generativos, como as gramáticas de forma ou os L-Systems, podem ser utilizados com o mesmo propósito, por também se basearem em regras.

Quadro 19: Estratégias para a programação do sistema generativo.



Definem-se blocos elementares como um conjunto de elementos associáveis entre si, por meio de suas características geométricas. Essa associação pode acontecer caso dois ou mais elementos tenham alguma semelhança, como pontos de mesma coordenada ou semirretas de mesma dimensão e inclinação. No Watercube, os oito poliedros da espuma Weaire-Phelan possuem faces semelhantes. No Fedsquare, os triângulos da construção Pinwheel Tiling apresentam lados proporcionais e de mesma dimensão. Em ambos os casos, os componentes do bloco elementar se conectam por meio dessa compatibilidade, a partir da qual as definições matemáticas envolvidas foram pensadas e utilizadas.

Em situações de projeto, a forma geométrica impõe, de alguma maneira, restrições à composição estrutural ou aos blocos elementares. Nos estudos de caso, a opção inicial pelo cuboide implicou, por exemplo, que alguns elementos fossem dispostos de maneira coplanar. Nesse caso, as formas obtidas tanto pelo fatiamento do Watercube, quanto pela definição prévia da fachada do Fedsquare, resultaram de imposições que podem ser entendidas no âmbito da computação como restrições. Nos experimentos efetuados com os estudos de caso essas

restrições foram expressas em termos de funções. Neste caso, a função estrutural de um pórtico que, por definição, deve produzir um vão.

A análise das condições de estabilidade da estrutura durante a pesquisa da forma foi uma condição predominante nos experimentos realizados, realizada por meio de simulações sistemáticas e integradas aos processos de modelagem. Esses procedimentos são fundamentais, a fim de controlar os resultados produzidos e evitar a obtenção de uma solução muito distante do que poderia ser factível. Desse modo, buscou-se aprimorar a integração entre os mecanismos de análise estrutural integrado ao mecanismo iterativo dos CA, de modo a conectar o sistema generativo com plataformas ferramentas externas de Building Information Modeling e de dimensionamento estrutural.

A integração do sistema generativo com os métodos digitais de fabricação abre possibilidades para a produção de automatizar seus processos produtivos. Nesse método, buscou-se orientar o sistema generativo a partir de métodos digitais de produção, buscando explorar estratégias para a concepção de estruturas com base em processos investigativos para a sua forma.

6.1 DEFINIÇÃO DO BLOCO ELEMENTAR

As definições matemáticas mostradas nos dois estudos de caso permitem extrair considerações mais genéricas sobre sua abordagem pois, em ambos os casos, conceitos como repetição e simetria são aplicados a uma configuração conhecida, proveniente de definições matemáticas. Preencher o espaço com poliedros, por exemplo, gerando uma espécie de mosaico tridimensional, é uma técnica historicamente explorada no âmbito da geometria, desde a definição de sólidos propostas por Platão ou Aristóteles. A diferença que pode ser considerada significativa, entre os antigos mosaicos e a estrutura de poliedros ou triângulos dos edifícios Watercube e Fedquare é, de fato, os modos de manipulação da estrutura geométrica e o fato de ambas buscarem uma aparência de aleatoriedade. Uma das características de sistemas generativos como os autômatos celulares é que eles são elementos (ainda que codificados) que se configuram em redes regulares, nas quais a geração seguinte é um produto baseado na geração anterior. Em comparação com os sistemas tradicionais que também utilizam regras para a manipulação geométrica, os CA apresentam basicamente a vantagem de iterar regras semelhantes de maneira automatizada, cujo limite de manipulação do elemento é expandido pela capacidade dos computadores. Isso não significa dizer que não existam restrições a serem

consideradas nesse processo. Os CA_{2D}, por exemplo forçam a iteração a sempre acontecer no plano bidimensional.

Ao se vincular o processo iterativo baseado em CA com blocos elementares se está, de fato, produzindo um mecanismo para a geração de alternativas dentro do espectro de soluções definidas limitadas à diversidade das regras e às dimensões do bloco. O sistema que tem sido discutido até os dias atuais proporciona efeitos fixos em uma estrutura geométrica e, pelo menos durante o processo iterativo, esses efeitos não podem ser alterados, o que também suscita uma série de movimentos dinâmicos ao longo processo criativo, que subentende, dentre outras tarefas, dois processos fundamentais: a alteração da geometria (bloco elementar) e do CA (dispositivo iterativo).

Na quase totalidade de casos, uma rede de elementos geométricos pode ser descrita, fundamentalmente, como uma coleção de nós com várias conexões entre os mesmos e regras que especificam como essas conexões devem se alterar de um instante para outro. Um sistema desse tipo pode ser entendido como um circuito elétrico, no qual os nós da rede correspondem aos componentes do circuito e as conexões aos fios que unem estes componentes. Da mesma forma que um circuito elétrico, as propriedades do sistema generativo dependem da informação sobre como realizar essa conexão e não propriamente determinar a disposição dos elementos. Diferentemente de um simples empilhamento de elementos, a construção de uma rede geométrica orientada pelo sistema generativo permite definir restrições mais abstratas, como apenas o número de conexões entre os nós, por exemplo.

A hipótese lançada nesta pesquisa, relacionada à possibilidade de obtenção de uma liberdade formal a partir de componentes padronizados, produz o principal requisito deste sistema generativo que pode ser descrito em como estabelecer uma correspondência dos CA com um espaço ordinário. É preciso considerar que essa rede de elementos pode conter um número de nós que se eleva exponencialmente de acordo com a definição desse espaço em uma, duas ou três dimensões. Em qualquer destes instantes, os elementos básicos são os nós e as conexões, mas a estrutura global desses elementos em uma grande escala fará emergir uma estrutura complexa a partir das mesmas propriedades utilizadas em uma estrutura simples (*Figura 81*).

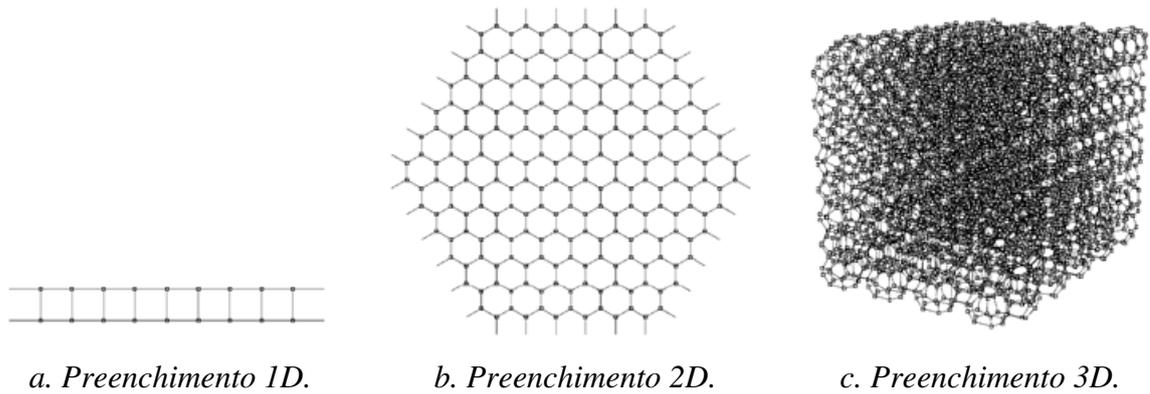


Figura 81: Métodos de preenchimento do espaço a partir de nós (pontos).

Fonte: Ilustração nossa.

Os raciocínios e operações que serão descritos baseiam-se na vinculação dos blocos elementares e nos CA dentro da ideia da posição de pontos em um dado espaço de busca. A partir dos experimentos realizados nos estudos de caso, buscou-se generalizar os mesmos conceitos a partir das noções paramétricas de modelagem, utilizando para isso rotinas de programação por meio de componentes visuais e scripts. Esse conceito foi desenvolvido a partir da definição de alguns objetivos a serem realizados por esse conjunto de instruções algorítmicas e, a partir deles, outros experimentos puderam ser realizados visando o delineamento das potencialidades desse sistema generativo.

6.1.1 Implementação computacional

Como se pode observar por meio dos estudos de caso, os blocos elementares permitem produzir uma composição geométrica a partir da conexão com seus pares. Essa conexão, em geral, deve ser um elemento geométrico cuja informação sobre sua construção possa ser extraída por meio de parâmetros numéricos. No caso do Watercube, os três tipos de faces dos dois poliedros que compõem a espuma Weaire-Phelan são comuns aos dois sólidos. Assim, todo o conjunto de poliedros pode ser descrito de maneira numérica, por exemplo, pelas coordenadas dos vértices destas faces. No caso do Fedsquare, cujo bloco elementar é um elemento plano, a vinculação informacional entre os elementos é feita a partir dos lados do triângulo de mesma dimensão.

Sendo o ponto o elemento mais fundamental do espaço euclidiano, descrever essa conexão entre os componentes do bloco elementar a partir de coordenadas cartesianas (X, Y e Z) é um dos caminhos mais eficientes para obter uma informação clara sobre um bloco elementar. Outras estratégias de aquisição da informação sobre esses blocos podem ser adotadas, mas a cada incremento informacional eleva-se exponencialmente a quantidade de informação a ser

manipulada. Em termos práticos, o endereçamento de uma reta como argumento de um sistema generativo pode ser efetuado a partir das coordenadas de suas extremidades, ou das coordenadas de uma das extremidades mais a sua inclinação e seu comprimento. Na primeira alternativa as informações podem ser agrupadas dentro de um mesmo plano, utilizando os três pontos. Na segunda, a informação é relacional e sugere necessariamente o conhecimento da inclinação da reta em relação a um dos planos projetivos (XY, XZ ou YZ).

Na construção do sistema generativo também é necessário estabelecer um referencial entre o bloco elementar e o autômato, que permita vincular a informação extraída a partir do elemento geométrico com os elementos iteráveis do CA. Nos experimentos realizados com os estudos de caso, os centroides, tanto dos sólidos da espuma *Weaire-Phelan* quanto dos triângulos da construção *Pinwheel Tiling*, funcionaram como elemento de ligação entre o bloco elementar e o dispositivo iterativo. Desse modo, a ideia é descrever quaisquer elementos, ou conjuntos de elementos, a partir de um elemento simples, e que pode ser representado numericamente.

Além disso, no conceito por detrás das estruturas dos dois estudos de caso, os blocos elementares foram individualizados em elementos 3D ou 2D e, assim, para se produzir as faces bidimensionais (parece redundante) nas fachadas do Watercube ou as barras não coplanares no Fedsquare, recorreu-se a procedimentos adicionais que não tinham relação com a ideia inicial dos blocos elementares. No entanto, ao se endereçar os elementos geométricos de maneira numérica dentro de um sistema generativo, o mesmo bloco elementar pode conter versões nos ambientes 2D e 3D e, desse modo, permitir a adaptabilidade do autômato para efetuar o preenchimento da forma segundo superfícies planas ou não, dependendo da posição do centroide. Um exemplo desse procedimento poderia ser a definição de um bloco elementar argumentado numericamente pelos quatro vértices de coordenadas A: (0,0,0); B (0,6,0); C: (3,6,0); D: (3,2,6), cuja versão bidimensional altera a posição do centroide e suprime a posição de memória onde está alocado o vértice D (*Figura 82*).

Não existe apenas uma maneira de efetuar a vinculação entre o bloco elementar e o dispositivo iterativo. Todos os elementos fundamentais do CA podem ser descritos com valores numéricos, de modo que a correspondência entre a geometria do bloco geométrico e o autômato pode ser construída compatibilizando as dimensões numéricas dos dois. Em geral, a base numérica que suporta os elementos de um CA: estados, vizinhanças, instantes de tempo e gerações, é descrita

a partir de números naturais e, assim, esse conjunto de números pode ser utilizado para estabelecer essa relação.



a. Bloco elementar na versão tridimensional ABCD b. Bloco elementar na versão bidimensional ABC

Figura 82: Mesmo bloco elementar podendo funcionar nas versões 3D e 2D.

As células são slots de informação que não estão preenchidas ou não existem, pelo menos não antes de iniciar qualquer processo de iteração, o que torna esse elemento o mais adequado para representar uma geometria por meio de um autômato. Uma vez que não está preenchida, a célula é passível de representar qualquer elemento geométrico descrito por informações, como números reais. Embora estes conjuntos numéricos sejam algumas vezes representados por números naturais, as posições específicas no plano cartesiano, como os pontos de coordenadas X, Y e Z, podem ser descritos como uma lista ordenada de números naturais que representa coordenadas com casas decimais.

Dentre as possibilidades que a computação fornece para ordenar dados segundo uma lista, as matrizes estão entre as mais utilizadas e, no caso dos CA, pode-se utilizar os seus índices numéricos para identificar a proximidade entre as células. Uma célula identificada pelo índice 28 terá a sua esquerda a célula 27 e, a sua direita, a célula 29. De maneira mais geral, pode-se dizer que, para qualquer célula i , seus vizinhos são $i - 1$ e $i + 1$ e, desse modo, os pontos correspondentes de um bloco elementar podem ser endereçados pela posição que ocupam na configuração estrutural estabelecida.

No ambiente virtual, tanto as células quanto as regras podem ser programadas de maneira mais generalizada por meio de funções cuja estrutura básica pode permitir mudar o modo como operam. No *Quadro 20* apresenta-se uma alternativa de endereçamento de blocos elementares

tanto para a estrutura Weaire-Phelan, como oito poliedros, quanto para uma estrutura piramidal, composta por meios octaedros.

Quadro 20: Alternativa de uma subrotina de programação na qual um CA pode ter suas células endereçadas a diferentes blocos elementares.

C#	Porção de código
	<pre> ... class CA { int[] celula; int[] regra; int w = 10; int geracao = 0; // A variavel geracao vai receber o 0 inicialmente CA() { celula = new int[width/w]; regra = {0,1,0,1,1,0,1,0}; celula[celulas.length/2] = 1; } // Função para computar a nova geração void geracao() { int[] proxGer = new int[cells.length]; for (int i = 1; i < celulas.length-1; i++) { int left = celulas[i-1]; int me = celulas[i]; int right = celulas[i+1]; proxGer[i] = regra(esquerda, c, direita); } celulas = proxgeracao; // Incrementando um contador para a nova geração geracao++; } int regra(int a, int b, int c) { string s = "" + a + b + c; int index = Integer.parseInt(s,2); return regra[index]; } for (int i = 0; i < celula.length; i++) { if (celula[i] == 1) fill(0); else fill(255); // configurando a posicao y de acordo com a geração rect(i*w, geracao*w, w, w); } } </pre>

Fonte: Autor.

Nos experimentos efetuados com os estudos de caso, o endereçamento da geometria por pontos utilizou sempre malhas retangulares, uma vez que a forma global dos edifícios em questão era composta por elementos desse tipo. Nas células posicionadas nas bordas das malhas, isto é, de apenas um vizinho, a opção utilizada foi que as células se mantivesse estáticas, com o valor dos estados invariável. Isso funciona para a reprodução de estruturas como a do Watercube e do Fedsquare, que estão limitadas por superfícies planas e retangulares. Para outros tipos de superfície, é possível utilizar pelo menos duas estratégias:

- Bordas envoltentes, imaginando o CA como um anel, isto é, a célula na borda esquerda é vizinha da célula da borda direita e vice-versa;
- As bordas têm regras específicas.

A primeira opção pode ser implementada utilizando um laço condicional que ignora as células nas bordas esquerda e direita, fazendo com que a iteração continue sendo mostrada entre a segunda e a penúltima. Nestas, a influência das três células vizinhas continua ocorrendo normalmente (*Quadro 21*).

Quadro 21: Sub-rotina que exclui as bordas do autômato.

C#	Porção de código
	<pre> ... for (int i = 1; i < celula.length-1; i++) { //Um laço que não considera a primeira e a última célula int esquerda = celula[i-1]; int middle = celula[i]; int direita = celula[i+1]; int estadoSeguinte = regra(left,middle,right); celula[i] = estadoSeguinte; } </pre>

Fonte: Autor.

Nesta implementação, o mesmo o conceito de limites foi utilizado para propor restrições ao CA em pontos específicos de sua iteração. Graficamente, estes limites podem ser representados por semirretas, curvas, superfícies ou sólidos, que determinam locais onde o CA pode atuar durante o processo de iteração. Experimentalmente, utilizou-se uma curva conhecida interpolando pontos a partir de uma série de valores argumentados à função $f(x) = \text{sen } \theta$ e, assim, dispoendo os valores de domínio e contradomínio como pontos cartesianos de coordenadas X e Z, respectivamente. A partir dessa curva-guia, buscou-se estratégias para definir limites para o sistema generativo.

Um tetraedro de faces triangulares foi definido como bloco elementar cujo ponto de menor cota, denominado de base, se encontra 3 unidades abaixo dos outros três A, B e C e estes descrevem um plano paralelo ao plano horizontal XY. Desse modo, o bloco elementar possui quatro faces iguais, triangulares, e com uma altura de 3 unidades. Além disso, determinou-se o centroide do tetraedro, que será utilizado como argumento do CA. A ideia foi vincular a curva-guia ao bloco elementar alinhando os pontos dessa curva aos centroides dos sólidos e delimitando a área de iteração do autômato a partir das distâncias entre os dois elementos (*Figura 83*).

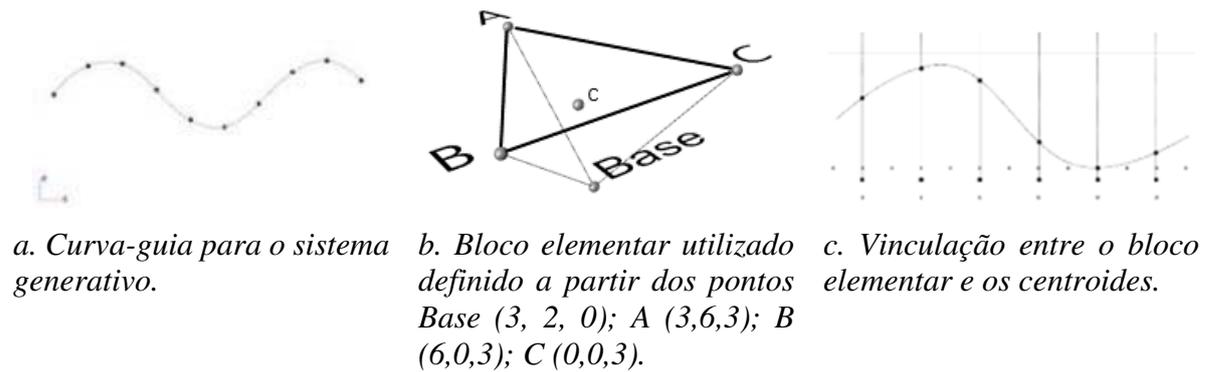


Figura 83: Elementos do sistema generativo. Fonte: Autor.

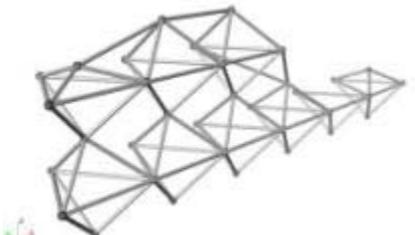
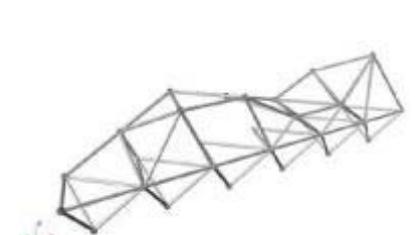
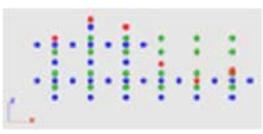
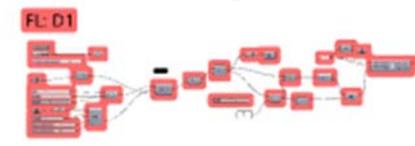
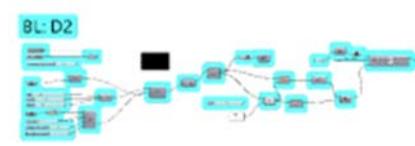
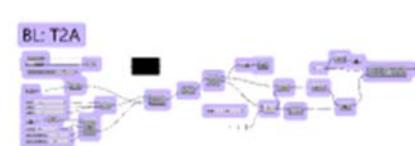
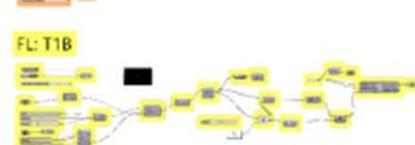
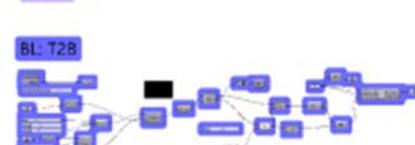
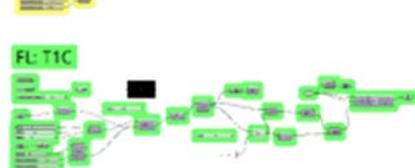
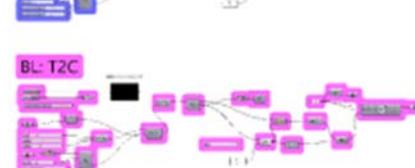
Conforme se pode observar, a linha que passa por cada centroide intercepta a curva-guia em apenas um ponto e neste ponto a iteração deve ser interrompida por outra regra. Utilizando instruções condicionais, os pontos da curva podem ser vinculados aos pontos do bloco elementar por meio de linhas. As instruções consistem em determinar uma distância ou passo para células iteráveis a partir da posição que ocupam em relação à curva. Como o comando snap, comum em aplicativos de modelagem e que permite que o cursor se posicione apenas dentro de intervalos definidos, o snap da iteração deve ser a altura do bloco elementar. Desse modo, o CA opera em quaisquer quantidades de células, mas somente os blocos elementares inteiros são considerados como elemento da estrutura. Nesse caso, a instrução considerará somente as células (c) abaixo da curva e com distâncias em Z inferiores a 3 unidades: $cviva = \text{hinterseção} - 3$.

Portanto tem-se três grupos de dados numéricos: os centroides (verde), os pontos da curva (vermelho) e os nós da estrutura (azul). Os centroides são as células vivas iteráveis sobre as quais pode-se programar qualquer CA, 1D ou 2D, similares aos implementados nos estudos de caso, a fim de explorar configurações diversas. Os pontos da curva não iteráveis passam a fazer parte da estrutura e são vinculados aos blocos elementares de maneira automatizada, a partir de suas posições de memória. Por fim, os nós da estrutura são os vértices do bloco elementar que se conectam a partir de linhas e estas serão as barras da estrutura.

Nesta implementação, além de ajustar o CA dentro do espectro de busca definido pela curva-guia, buscou-se ainda uma segunda alternativa procurando correlacionar a própria curva-guia com as dimensões do bloco elementar. Isso pode ser feito correlacionando o intervalo de iteração baseado na altura do bloco elementar (*snap*) com os pontos de interseção na curva. Nesse caso se produz um abatimento da curva produzindo uma solução estrutural um pouco

distante da forma inicial pretendida. Por outro lado, tem-se uma configuração estrutural ainda mais racional, composta apenas de blocos inteiros ou meios blocos, podendo também ser efetuada sem o auxílio da curva-guia, apenas sugerindo valores para a instrução condicional (*Quadro 22*).

Quadro 22: Geração de estruturas a partir do sistema generativo.

Grasshopper3D	Porção de código	
<ul style="list-style-type: none"> ● Centróides (Células) ● Pontos na curva ● Nós da estrutura 		
 <p data-bbox="229 840 526 940">Implementação computacional por meio de componentes gráficos</p>	<p data-bbox="526 806 973 884">Estrutura gerada pela curva seno e CA_{1D}: Regra 255</p>	<p data-bbox="973 806 1426 884">Amortecimento da curva adaptando-a às dimensões do bloco elementar.</p>
		
		
		
		

Fonte: Autor.

A partir desse conceito, soluções estruturais podem ser exploradas dentro de outros contextos arquitetônicos, cujas formas globais de um edifício podem ser delimitadas por superfícies ou por planos, como no caso dos estudos de caso. Nesse processo de pesquisa da forma estrutural, três estratégias devem estar claras: 1) definição de um ou mais blocos elementares, estabelecendo dimensões e determinando os elementos que funcionarão como argumentos do sistema generativo; 2) definição do espaço de busca da solução, que pode ser definido por espaços numéricos ou elementos geométricos, sendo que estes últimos também devem ser descritos de modo numérico e; 3) estabelecimento das regras nas bordas do autômato, a fim de

definir comportamentos que vão além dos limites de iteração baseado no bloco elementar (*snap*).

Os comportamentos apresentados pelos CA nas suas diferentes modalidades: uniformidade, periodicidade, complexidade e outros, podem ser utilizados como testes para o conceito apresentado dentro do ambiente de projeto. Como ferramenta criativa, esse método permitirá produzir diferentes candidatos a solução de projeto, os quais são passíveis de serem avaliados também dentro das plataformas de projeção paramétricas. Isso permite que a solução estrutural seja construída paulatinamente, em conjunto com as possibilidades não só da forma global do objeto arquitetônico, mas também do bloco elementar, incorporando, ao longo desse processo, soluções que contemplam estes campos correlatos de conhecimento.

6.2 RESTRIÇÕES DA FORMA

Desde a publicação da obra *Performative Architecture: Beyond Instrumentality* (KOLAREVIC e MALKAWI, 2005), os arquitetos têm se preocupado cada vez mais em utilizar o bom desempenho como um princípio norteador do projeto. Essa conduta sempre esteve presente na obra dos principais arquitetos da história, mas, segundo esses autores, a disponibilidade atual de programas de simulação facilitou enormemente a incorporação dos resultados das análises de desempenho, em especial o ambiental e o estrutural, nas etapas iniciais de projeto. No entanto, a retroalimentação dos resultados dessas análises nem sempre é feita de maneira automatizada, pois isso exige o desenvolvimento de programas com capacidades generativas, o que implica necessariamente na adoção de condutas projetuais específicas. Em outras palavras, em um cenário ideal, o projetista deveria ser capaz de programar suas próprias ferramentas, de modo a obter a automatização da incorporação do resultado das análises em seu processo de projeto.

Com a evolução dos aplicativos de modelagem, em especial na década de 1990, a maneira de modelar formas arquitetônicas em ambientes computacionais sofreu grandes transformações, principalmente por causa da evolução dos aplicativos de modelagem. Certamente uma das maiores mudanças foi a modelagem auxiliada por linguagens de programação orientada a objetos, o que permitiu o controle e a geração virtual das formas por meio de conjuntos de dados numéricos. Atualmente esse conceito de modelagem paramétrica pode também ser feito por meio de técnicas de programação por componentes visuais e scripts para a manipulação de

formas dentro do contexto do Design Computacional, o que tornou a programação muito mais acessível para não programadores, resultando em uma grande difusão do uso dos processos algorítmicos de projeto.

As estratégias de design paramétricas e os sistemas generativos estão fortemente relacionados aos aspectos de controle da forma geométrica e, conseqüentemente, à produção de diversas soluções de projeto balizadas por parâmetros definidos pelo próprio projetista. No entanto, em muitas situações, os aspectos produtivos das soluções arquitetônicas ficam em parte comprometidos quando se consideram as propriedades dos materiais somente de modo subsequente à concepção formal. No design de arquitetura, uma situação mais interessante é o controle paramétrico não só nos domínios formais, mas, sobretudo, a conjugação destes com o controle das propriedades dos materiais. Isso permite, por exemplo, que decisões do âmbito produtivo norteiem também a parametrização proposta pelo projetista.

Neste experimento buscou-se incrementar uma seqüência fundamentalmente *top-down*, isto é, definição da forma precedendo a solução da estrutura, com o sistema generativo *bottom-up*, desenvolvido a fim de avaliar as implicações relacionadas à combinação dessas abordagens dentro do ambiente de projeto. A seqüência baseada em técnicas de modelagem paramétrica consistiu na elaboração da definição de uma superfície geométrica baseada em curvas com parâmetros conhecidos, por meio dos quais as variações da forma pudessem ser controladas. Do ponto de vista funcional, essa forma geométrica foi entendida como uma superfície de cobertura, para a qual se desenvolveu uma estrutura de sustentação a partir de seus parâmetros.

A ideia então foi extrair alguns parâmetros dessa estrutura e utilizá-los como subsídio para outra estrutura, baseada nos métodos investigados com os CA, que pudesse estruturar a mesma superfície. Desse modo, ao contrário de se definir de maneira paramétrica, mas ainda assim, sequencial, forma e estrutura, define-se conjuntamente a superfície e os parâmetros definidores dos blocos elementares. Com isso, foi possível avaliar as possibilidades dessa estratégia e concluir sobre as maneiras de se delinear os problemas de projeto a partir da combinação dessas duas abordagens, com características *top-down* pela forma preceder a estrutura, mas também com características *bottom-up* pois, ao invés da forma dirigir a geração da estrutura, ela orienta os parâmetros de seu bloco elementar.

A fim de delinear esta investigação dentro de um espectro de análise que permite a comparação entre as duas abordagens, foram definidos argumentos relacionados à geometria e aos materiais

constituintes das estruturas, particularmente os tipos de tubos e as seções transversais. Além disso, buscou-se programar dentro da plataforma duas restrições baseadas na Norma Técnica Brasileira, relacionadas às inclinações e à esbeltez das barras, visando delimitar os mecanismos de busca de soluções por estes aspectos funcionais. Com o uso de linguagens de programação por componentes visuais e scripts, foram desenvolvidos quatro procedimentos: 1) definição de uma superfície geométrica controlada por duas de suas diretrizes opostas, definidas por funções trigonométricas; 2) determinação dos elementos de uma treliça, banzos e diagonais, com base em regras topológicas; 3) utilização de um banco de dados com propriedades geométricas das seções tubulares; 4) programação de restrições, com base em procedimentos de cálculo constantes da norma brasileira.

Os principais aplicativos computacionais utilizados foram o Rhinoceros 3D (McNell & Associates, Inc., versão 5 RS5) incrementado por métodos baseados na biblioteca de classes Rhinocommon SDK, por meio de cápsulas gráficas do add-on Grasshopper 3D (versão 0.9.0056) ou manipuladas diretamente por scripts da linguagem Python (Python.org, versão: 3.5.2). As restrições programadas a partir de condições dispostas na norma brasileira foram: 1) limitação da inclinação das diagonais proposta pela norma NBR/CB-02 (ABNT, 2011), que sugere que os ângulos entre o banzo inferior e as diagonais não sejam inferiores a 30° ; 2) a limitação da esbeltez das diagonais, com base no índice de esbeltez para barras bi-articuladas, proposto pela NBR8800 (ABNT, 2012), no qual o limite “ K/r ” para barras comprimidas não pode ser superior a 200. Os materiais utilizados para essas verificações foram os perfis tubulares circulares sem costura, predominantes no mercado brasileiro, cujas propriedades geométricas constam dos catálogos da siderúrgica Vallourec & Mannesmann.

6.2.1 Implementação computacional

Existem diversas maneiras de se obter uma superfície controlada por pontos e, nesta investigação computacional, optou-se pela definição de duas curvas diretrizes dispostas em planos paralelos e obtidas a partir de pontos de controle. A condição que norteou o procedimento foi que a posição dos pontos definisse a configuração da superfície e, apenas por questões de simplificação analítica, os pontos variam de posição nas direções dos eixos ortogonais X e Z, de modo que a projeção horizontal da superfície (no plano XY) formasse sempre um retângulo. Dentre as opções predominantes de curvas controladas por pontos externos à curva B-Spline ou internos à curva por interpolação, esta última se mostrou mais conveniente, uma vez que os pontos podem representar também os nós estruturais. Para um

efeito similar, é possível projetar os pontos de controle das B-Splines sobre elas mesmas, o que implica em um procedimento adicional.

Embora os pontos de controle possam ser definidos de maneira aleatória, a possibilidade de vinculá-los às curvas como contradomínios de uma função matemática é uma possibilidade que permite o controle no processo. Com esse objetivo, utilizaram-se as funções seno e cosseno como definidoras para as diretrizes opostas da superfície. Os domínios dessas funções foram definidos por séries matemáticas, a fim de se obter uma quantidade de algarismos reais determinados por um algarismo antecessor incrementado de um valor, que corresponde ao passo da série. Estes valores foram dispostos como as coordenadas X dos pontos de controle, enquanto os contradomínios das funções forneceram as coordenadas Z. Desse modo, a configuração das curvas estão sempre distorcendo a superfície pela quantidade de pontos de controle, desde que estes sejam maiores do que 1. Havendo apenas um contradomínio para as funções, obtém-se uma superfície plana e, além disso, a largura e o comprimento da projeção horizontal da superfície são definidos pelos últimos algarismos da série (*Figura 84*).

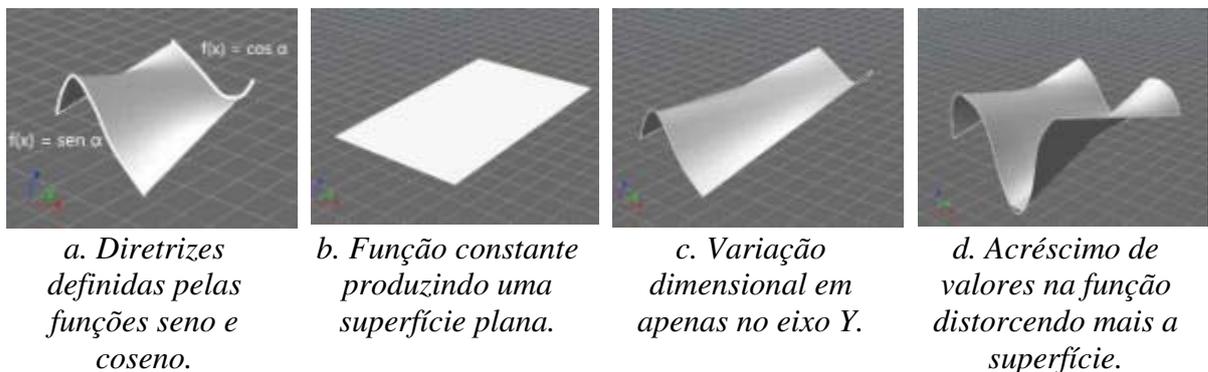


Figura 84: Superfície controlada por um conjunto de argumentos que nutrem funções trigonométricas. Fonte: Autor.

A definição dos elementos estruturais baseada nessa superfície de diretrizes trigonométricas seguiu algumas regras. A primeira delas foi dividir a superfície segundo as direções de dois vetores unitários “u” e “v” gerando assim uma malha retangular de espaços (*mesh*), cujas linhas serviram de eixos para os elementos estruturais do banzo superior da treliça. Os demais elementos estruturais foram obtidos a partir da definição de uma regra tipológica que consistiu em definir os centroides dos retângulos e projetá-los em um plano horizontal, paralelo ao plano XY.

Desse modo, definiu-se um schema repetitivo de semi-octaedros de base retangular (pirâmides invertidas). As arestas desses elementos constituíram os eixos das barras da treliça espacial.

A inserção das propriedades dos componentes construtivos da treliça consistiu em nutrir esse modelo baseado em informação com as propriedades geométricas dos perfis tubulares circulares. Essa opção se fez pelo uso difundido das seções circulares em estruturas de treliças, já que a mesma apresenta níveis superiores de resistência à instabilidade por flambagem quando submetida a esforços compressão. Em síntese, a circunferência é a única linha que possui todos os seus pontos equidistantes de seu centro e, devido a essa simetria radial, aplicando-se uma força de compressão ao centro geométrico e perpendicular à seção circular, todas as tensões percorrerão as mesmas distâncias, evitando-se, assim, assimetrias ou direções preferenciais para que ocorra flambagem. No *Quadro 23* mostram-se as propriedades de quatro perfis tubulares utilizados, do total de 21 inseridos no banco de dados desse sistema.

Quadro 23: Propriedade geométricas dos perfis de seção circular.

Tubos	Ø	H	m/c	A:mm²	MI	R	MeRF	MpRF	Perim
	73,0	7,1	11,50	14,70	80,7	2,34	22,10	31,00	0,229
	88,9	8,0	16,00	20,30	168,0	2,87	37,80	52,50	0,279
	101,6	8,0	18,50	23,50	260,0	3,32	51,10	70,30	0,319
	114,3	8,8	22,90	29,20	409,0	3,74	71,50	98,20	0,359

Fonte: Autor.

A primeira restrição programada foi a limitação da inclinação das diagonais propostas pelo projeto de norma NBR/CB-02 (ABNT, 2011). Para a validade dos procedimentos de cálculo, essa norma sugere que os ângulos θ entre o banzo e as diagonais e entre montantes e diagonais não sejam inferiores a 30° . Os casos contemplados por esse projeto de norma se concentram no dimensionamento de treliças planas e multiplanares, visando, principalmente, ao cálculo das ligações. Como experimentação, utilizaram-se os mesmos critérios, uma vez que não existem normas técnicas específicas para as treliças espaciais. A rigor, a limitação dessa inclinação se aplicaria aos ângulos esféricos formados entre as quatro diagonais e o banzo inferior. Tendo em vista a dificuldade de mensurar os ângulos esféricos, propôs-se dimensionar a inclinação entre uma diagonal e a barra do banzo inferior, o que equivale a uma aproximação satisfatória. Além disso, com base na mesma limitação, estabeleceu-se um limite superior de 60° para as diagonais, a fim de não as aproximar das características dos montantes.

Outra restrição programada foi fundamentada na aplicação do conceito de estabilidade na compressão axial das diagonais. Segundo a NBR8800 (ABNT, 2012), para os elementos de comprimento l , da mesma ordem de diâmetro D , não deve ocorrer a perda de estabilidade. Por definição, a carga crítica de flambagem, F_{CR} , ou carga de Euler, é o valor da carga F que provoca o fenômeno da mudança do estado de equilíbrio estável para o instável. Neste

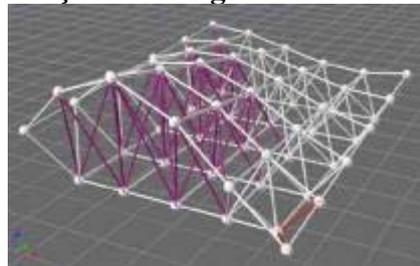
experimento, definiu-se uma condição de variação para F_{CR} , apenas para a teoria de 1ª ordem, na qual não se consideram os deslocamentos horizontais no estudo do equilíbrio da estrutura. A partir daí, propôs-se limitar a esbelteza das diagonais, com base no índice de esbelteza para barras bi-articuladas. Hipoteticamente, idealizou-se uma barra de seção constante inicialmente reta, mantida em sua posição original e deformada por uma carga axial F . A direção das ordenadas da elástica será a direção da menor rigidez contra flexão, lembrando que a seção circular é duplamente simétrica. Para cada um dos eixos tem-se: $N_e = (A_g f_y) / \lambda_2$, onde λ foi determinado conforme o item 5.3.4 da norma técnica, que define que o índice de esbelteza limite “ Kl/r ”, para barras comprimidas, não pode ser superior a 200 (*Quadro 24*).

Quadro 24: Exploração de forma e estrutura orientada por requisitos de dimensionamento.

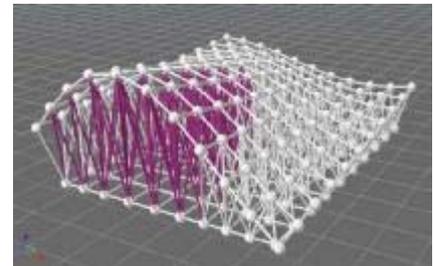
Grasshopper3D

- Inclinação < 30°
- Esbelteza < 200

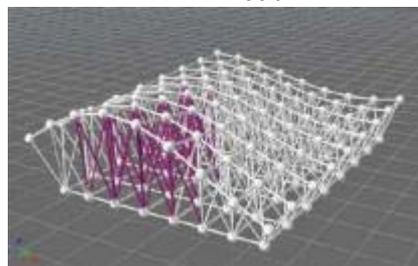
Porção de código



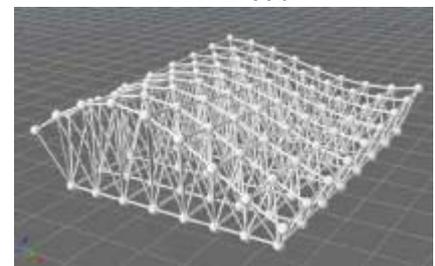
Divisões XY: 4; H_{MED} : 3.2;
Tubo: Ø 88.9



Divisões XY: 9; H_{MED} : 3.2;
Tubo: Ø 88.9



Divisões XY: 7; H_{MED} : 2.8;
Tubo: Ø 88.9



Divisões XY: 7; H_{MED} : 2.8;
Tubo: Ø 101.6

Fonte: Autor.

A partir das restrições “limite de inclinação” e “limite de esbelteza” obteve-se um sistema no qual as distorções da forma geométrica forneceram diferentes cenários. A verificação desses dois limites pode funcionar como um indicativo ao projetista para uma condição de instabilidade, a qual pode ser solucionada de diversas maneiras: novas distorções para a superfície geométrica, aumento do número de divisões da treliça, aumento da altura da treliça, ou aumento do diâmetro e espessura do tubo (este último somente como solução ao limite de esbelteza).

Ao se compararem estas estruturas identificando barras pouco inclinadas e/ou excessivamente esbeltas, percebem-se poucas diferenças em termos de uma intencionalidade formal de projeto. No entanto, pequenas alterações representam uma condição muito mais favorável em termos de estabilidade estrutural. É importante ressaltar ainda que apenas duas limitações foram impostas e, sem dúvida, isso representa uma grande redução analítica em termos dos efeitos verificados na prática. No entanto, aí reside uma condição que pode ser explorada através das plataformas paramétricas de projeto, pois ao implementar restrições desse tipo o projetista tem uma expansão nos níveis de entendimento do comportamento estrutural do elemento que está sendo proposto.

6.3 ANÁLISE ESTRUTURAL NOS ESTÁGIOS INICIAIS DO PROCESSO DE PROJETO

Conforme pôde-se observar nos estudos de caso do Watercube e do Fedsquare, a aproximação de questões relacionadas ao dimensionamento estrutural ainda nos estágios iniciais dos processos de projeto foi algo determinante para a solução final das estruturas. Em ambos os contextos, as análises estruturais aconteceram desde os primeiros partidos arquitetônicos, sendo parte importante e efetiva do processo criativo. De fato, os estudos sobre as estruturas dos dois edifícios possuem uma preponderância em termos conceituais, uma vez que as mesmas concentram uma parcela significativa dos objetivos dos projetos.

No entanto, mesmo nos casos em que o design estrutural não tem tanta preponderância, as análises estruturais podem ratificar ou revogar soluções nas quais é difícil realizar afirmações sobre a pertinência, viabilidade e até a necessidade de elementos estruturais. Em geral, quando as análises estruturais são entendidas como uma etapa subsequente do processo de projeto arquitetônico, diversas oportunidades são perdidas, pois, além de permitir soluções mais adequadas, a aproximação com conceitos de design estrutural contribui para o aumento do repertório de soluções e, conseqüentemente, para a experiência dos projetistas.

De maneira inequívoca, as estruturas de elevada complexidade necessitam das análises estruturais como uma condição de existência. Independentemente da solução de problemas de uma forma complexa, a partir de abordagens *top-down* ou da previsão antecipada de problemas, a partir de uma abordagem *bottom-up*, conhecer o comportamento da estrutura é algo tão fundamental e pertinente, que é quase impossível relegar a sua existência a um estágio

subsequente. Desse modo, nos processos de projeto que visam os aspectos produtivos e de fabricação, o entendimento estrutural passa a ser um desafio constante.

Atualmente, as plataformas de modelagem baseadas em dados permitem que vários profissionais atuem de modo conjunto e solidário visando a construção de uma solução baseada em diversas áreas do conhecimento. A transdisciplinaridade imaginada nesse processo suscita que as interferências entre os diversos projetos sejam minimizadas a níveis bem reduzidos e que a necessidade de compatibilização das informações seja terminantemente eliminada. Contudo, o estágio criativo dos projetos acaba por determinar muito do que acontecerá nas etapas subsequentes, que envolvem o ciclo de vida de uma edificação. É nesse estágio em que a informação nasce, começa a ser produzida e replicada, e o controle ou a ausência dele podem ter efeitos multiplicados.

Neste experimento propõem-se métodos para a análise estrutural dentro de plataformas de modelagem paramétrica, combinando a busca de uma solução por meio do sistema generativo com suas possíveis implicações no comportamento da estrutura. Desse modo, busca-se explorar métodos para a adequação do design estrutural *bottom-up*, com ferramentas de análise estrutural que possam ser utilizadas nos estágios iniciais do processo de projeto, sem, contudo, comprometer a dinâmica inerente à busca por soluções.

6.3.1 Implementação computacional

Nos estudos de caso foram identificadas possibilidades satisfatórias da manipulação de dados estabelecendo uma correspondência entre os centroides de formas geométricas – poliedros no caso do Watercube e triângulos no caso do Fedsquare – a fim de vincular o sistema generativo a esses elementos, facilmente identificados por três coordenadas cartesianas. Vincular uma lista de pontos como uma referência para uma geometria complexa é uma estratégia que geralmente reduz o tempo de processamento computacional utilizado nos processos que envolvem a definição de estruturas de elevada complexidade. Relacionar o mecanismo de iteração de células do CA com pontos XYZ permite que a manipulação do autômato aconteça de maneira independente e que outras operações sejam empregadas sobre esses elementos gráficos posteriormente.

Neste experimento, vinculou-se novamente uma malha de pontos a um mecanismo iterativo baseado em CA, a fim de produzir uma dispersão de pontos em um espaço delimitado. O espaço utilizado corresponde a um cuboide de arestas paralelas, cujas dimensões foram definidas de

modo paramétrico, por meio de uma coleção de algarismos reais variando de 0 a 10 metros. Utilizando técnicas de geometria associativa, vincularam-se as células (pontos) do CA a essa dimensão paramétrica do cuboide, de maneira que o autômato iterasse somente nesse espaço delimitado.

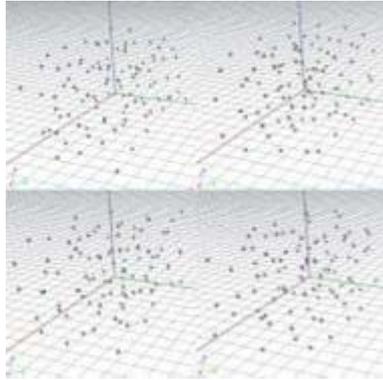
A dispersão de pontos foi promovida utilizando regras do Jogo da Vida mostradas no Capítulo Dois, nesse espaço tridimensional. Para isso, utilizaram-se as mesmas regras de morte, vida e êxtase em gerações iniciais (g_0) de pontos, dispostos em planos bidimensionais, cujas gerações subsequentes não apresentavam uma ordem identificável. Utilizando a média das distâncias desses pontos para os eixos XY, os mesmos foram copiados para o eixo Z em várias camadas e, desse modo, a cada nova geração do jogo da vida uma malha tridimensional de pontos pseudoaleatória foi sendo gerada.

Por fim, esses pontos foram conectados utilizando para isso a própria distância entre eles. Como regra, definiu-se que cada ponto se conectaria por meio de linhas com os pontos adjacentes, formando assim uma estrutura de linhas. Ainda dentro dessa regra, definiu-se que cada ponto poderia concentrar exatamente três linhas, o que produzia sempre uma triangulação. Desse modo, produziu-se um sistema generativo de estruturas triangulares obtidas por meio de regras pseudoaleatórias do Jogo da Vida. A cada nova geração desse CA2D tem-se uma nova estrutura triangulada, cuja barras são definidas pelas linhas e as conexões pelos pontos (*Figura 85*).

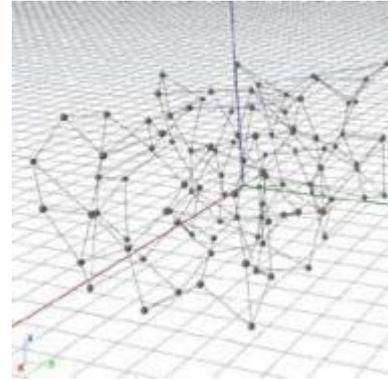
O intuito deste sistema generativo não foi de recriar estruturas com uma comprovada funcionalidade. Neste caso, buscou-se investigar possibilidades para a combinação de um sistema generativo baseado em CA com mecanismos de análise estrutural que pudessem ser facilmente incorporados aos estágios iniciais do design estrutural. Desse modo, os métodos investigados necessitaram cumprir pelos menos duas premissas: 1) estar diretamente conectados ao mecanismo iterativo dos CA, para que a busca pela solução pudesse se beneficiar das análises estruturais de modo instantâneo e; 2) apresentar compatibilidade com métodos utilizados nas etapas de dimensionamento das estruturas.

A fim de investigar a primeira premissa, exploraram-se métodos baseados na linguagem Rhinocommon SDK, a partir de componentes visuais pré-programados no add-on Karamba3D, em virtude de sua compatibilidade com o sistema de modelagem digital utilizada nesta pesquisa. Esse aplicativo permite que geometrias lineares, como B-Splines ou semirretas, sejam interpretadas como elementos estruturais e, partir dessa conversão, é possível vincular as linhas

com as propriedades geométricas de perfis estruturais, os quais serão utilizados no cálculo do modelo por meio do Método dos Elementos Finitos (FEM). Além de argumentar o modelo por meio de linhas, mais três informações são necessárias para concluir a sua montagem: 1) definição dos apoios; 2) definição dos carregamentos e; 3) definição dos materiais constituintes.



a. Quatro exemplos de dispersões de pontos obtidas com as gerações 30, 42, 67 e 81 do CA_{2D} .



b. Triangulação dos pontos.

Figura 85: Mecanismo *bottom-up* para a geração de estruturas de linhas obtidas a partir da dispersão de pontos, por sua vez obtida com formas de vida pseudoaleatórias do Jogo da Vida. Fonte: Ilustração nossa.

Funcionalmente, os apoios de uma estrutura predial vão estar definidos em virtude da configuração da forma do projeto, que pode utilizar poucos caminhos para as cargas, concentrando-as em pontos específicos, como pilares. Para fins de análise, neste experimento utilizaram-se pontos da própria estrutura espacial, os quais foram fixados como apoios do tipo engaste, isto é, impedindo o deslocamento destes pontos nas direções X, Y e Z. Tendo em vista a dinâmica da estrutura, que muda de configuração constantemente, a identificação e individualização desses pontos é prejudicada, mesmo manipulando a árvore de dados em que os mesmos estão inseridos. A alternativa foi utilizar uma instrução condicional, selecionando sempre os pontos mais próximos ao solo ou, em outras palavras, com cotas inferiores a 100 milímetros (*Figura 86*).

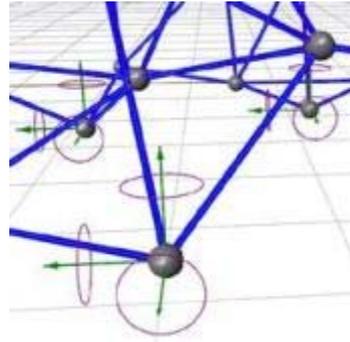


Figura 86: Definição dos apoios com cotas inferiores a 100 mm; os círculos fechados indicam o impedimento do movimento nas direções X, Y e Z.

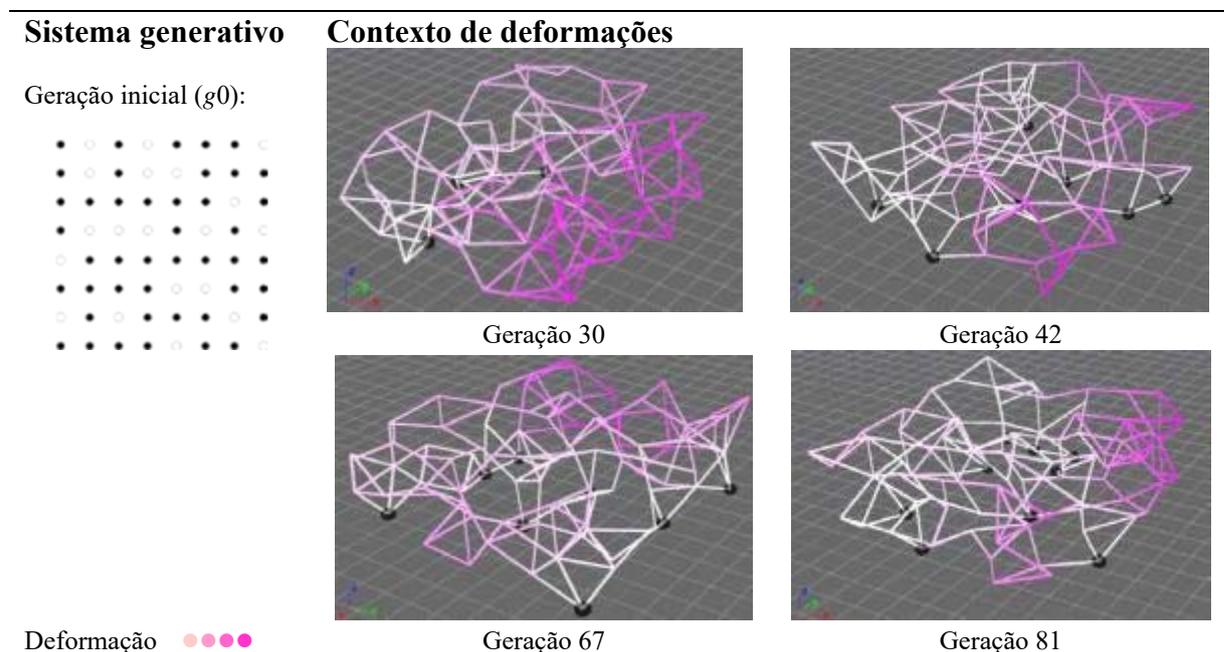
O dimensionamento estrutural de estruturas de elevada complexidade necessita de aplicativos computacionais robustos e essa etapa de projeto acontece, de fato, em um momento subsequente à definição da forma estrutural. Contudo, quando algumas variáveis desse processo são inseridas nos estágios iniciais da concepção, a etapa de dimensionamento, propriamente dita, acaba sendo entendida com um refinamento das soluções tomadas anteriormente. Entre a concepção e a produção de uma estrutura, vários efeitos como os previstos em análises de vibrações ou de segunda ordem ainda serão necessários, mas, como nos estudos de caso, as análises estruturais nos ambientes de modelagem constituem-se como uma ferramenta de apoio à decisão.

Neste experimento, definiram-se apenas efeitos de ações gravitacionais, decorrentes de cargas de peso próprio, embora seja possível definir tensões horizontais, a fim de simular ações de vento. Outros tipos de carregamentos estão pré-definidos na base de dados do Karamba 3D, como tensões provenientes de carregamentos pontuais ou distribuídos, temperatura, protensões, dentre outros. As ações de peso próprio foram definidas utilizando um vetor unitário Z, multiplicado pelo escalar -1, a fim de definir o sentido de aplicação da força. Além disso, utilizaram-se outros multiplicadores para a tensão gravitacional, buscando uma melhor visualização dos efeitos de deformação.

Por fim, a definição dos materiais constituintes também pode ser argumentada como uma lista de dados e não precisa, necessariamente, estar associada aos perfis metálicos. Contudo, as propriedades geométricas dos materiais têm de ser especificadas com informações suficientes para o cálculo do modelo. As propriedades geométricas dos perfis foram alocadas em planilhas do Excel (Microsoft, Inc.) e o arquivo pode ser vinculado ao Grasshopper3D por meio dos componentes de endereçamento e leitura do arquivo (*File Path* e *Read File*), transformando-os em uma família de seções transversais.

No mostram-se resultados do modelo que obtém estruturas a partir dos CA e que analisa alguns contextos de solicitações de maneira instantânea. Desse modo, foi possível combinar o processo de iteração dos CA com os resultados simultâneos das análises estruturais, construindo assim um mecanismo dinâmico de pesquisa da forma estrutural. Dentro dos parâmetros estabelecidos buscou-se selecionar estruturas com base nas quantidades de barras e quantidade de apoios, avaliando nestas o contexto global de deformações. Os apoios rígidos foram destacados por esferas na cor preta e as deformações representadas por uma variação gradiente do branco (nenhuma deformação) para o magenta (máxima deformação).

Quadro 25: Estruturas geradas com CA simultaneamente analisadas com o FEM.

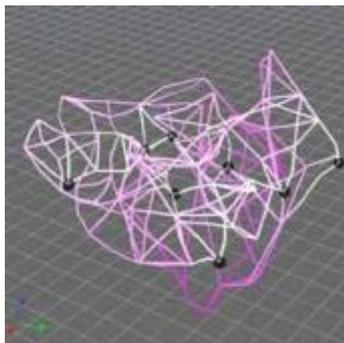


Fonte: Autor.

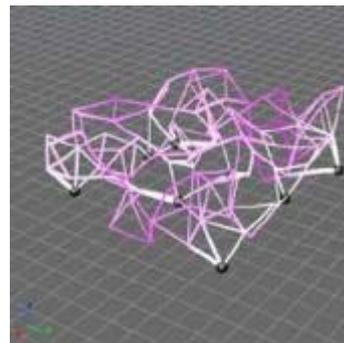
O *add-on* Karamba3D fornece ainda a opção de otimizar a seção estrutural com base em uma lista de seções que podem ser introduzidas ao componente Optimize Cross Section. Em geral, o projeto de estruturas metálicas não possui um cálculo estrutural, propriamente dito, isto é, ao invés de se definir a dimensão de um elemento estrutural a partir dos procedimentos de cálculo, testam-se elementos industrializados e de dimensões pré-definidas e o elemento adotado como solução deve atender às premissas estabelecidas no cálculo. Desse modo, o processo de otimização no Karamba3D funciona testando seções transversais em uma lista crescente até que se obtenha a primeira seção transversal suficientemente resistente ao contexto de tensões proposto. Assim, se obtém sempre as mínimas seções em virtude dos carregamentos.

No entanto, em relação aos aspectos produtivos, possuir vários perfis estruturais com seções diferentes pode onerar a construção da estrutura e, assim, uma condição mais interessante seria utilizar a menor quantidade de tipos de perfis, mas que fosse capaz de atender a todas as situações de tensões previstas em projeto. Além disso, as empresas produtoras possuem as chamadas “seções preferenciais”, que são as mais produzidas e com maiores chances de estarem disponíveis em estoque. Por fim, uma última consideração em relação aos aspectos produtivos é a dimensão dos elementos para o transporte. Em geral, os caminhões transportam peças lineares de até 12 metros de comprimento, o que significa que um elemento de 13 metros, por exemplo, seria uma situação especial e passível de receber uma emenda.

Estas são algumas das considerações que podem ser incorporadas aos processos de investigação da forma utilizando modelagem paramétrica e sistemas generativos. Durante esse processo simplificado de otimização, todas estas questões podem ser incorporadas como restrições ao processo de busca da solução. Neste experimento utilizou-se a lista de perfis tubulares Vallourec & Mannesmann do Brasil, restringindo as soluções as seções transversais preferenciais e adotando apenas dois tipos de seções a partir da identificação das deformações mínima, média e máxima: um tipo de seção transversal para todos os casos entre as deformações mínima e média e outra para todos os casos entre média e máxima. Esse processo de otimização foi efetuado concomitantemente ao processo de iteração e, a partir dele, foi possível ter uma avaliação mais precisa sobre o contexto de deformações da estrutura (*Figura 87*).



a. Análise de deformações da estrutura obtida com a geração 67, a partir de uma seção predefinida pelo add-on.



b. A mesma análise efetuada na mesma estrutura depois do processo de otimização.

Figura 87: Contribuição da otimização para a análise de deformações durante os processos de investigação da forma.

A ligação entre os métodos de pesquisa da forma como os modelos de informação da construção é necessária, uma vez que estes modelos oferecem suporte ao projeto ao longo de suas

fases, permitindo análises e controle dos processos produtivos dos sistemas do edifício. Estes modelos virtuais vinculam às geometrias a informação necessária para o apoio às atividades de construção, fabricação e aquisição de dados por meio das quais a construção é realizada. O modelo de dados IFC (Industry Foundation Classes) é um formato de arquivo baseado em objetos com um modelo de dados desenvolvido para facilitar a interoperabilidade na indústria de arquitetura, engenharia e construção (AEC).

É de suma importância vincular os sistemas generativos às plataformas que permitem o controle produtivo a partir de disponibilidade e compatibilidade de dados, cuja informação pode ser acessada e compartilhada pelos profissionais envolvidos ainda nos estágios criativos de projeto. Quando se propõem sistemas estruturais de complexidade elevada, a preponderância de se trabalhar dentro de uma plataforma que disponibiliza a informação se torna ainda mais evidente, pois, em geral, a ligação dessas estruturas com outros sistemas dentro de uma edificação nem sempre é uma solução direta ou trivial. Incrementar uma solução em complexidade implica em incrementar também as soluções de outros sistemas, para que estes últimos possam ser compatíveis com o primeiro.

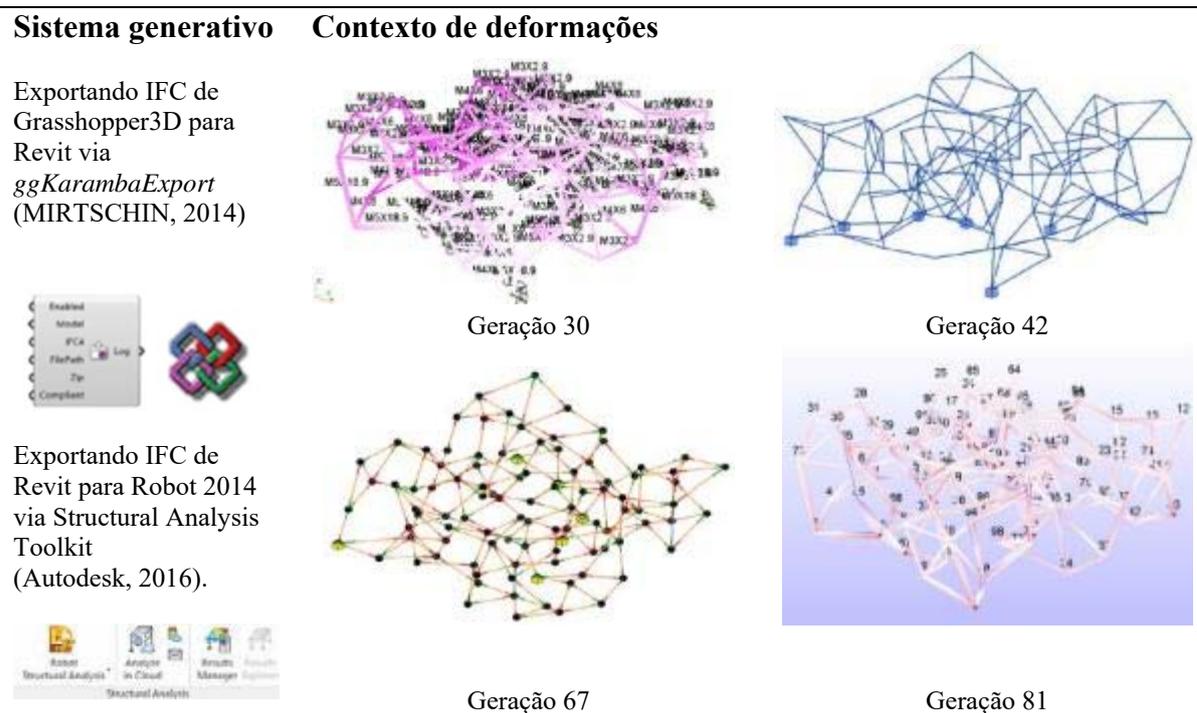
Neste método, buscou-se desenvolver procedimentos para a ligação entre o sistema generativo baseado em CA e as plataformas integradas de projeto de maneira a vincular a pesquisa da forma estrutural com os modelos capazes de gerenciar a coordenação de sua produção. Atualmente existem algumas ferramentas capazes de integrar aplicativos que têm como objetivo a modelagem nos estágios criativos de projeto com os aplicativos BIM. Essas ferramentas também apresentam problemas técnicos ligados à perda de informação na transição de arquivos, principalmente se o usuário utiliza aplicativos de fornecedores diferentes.

A fim de investigar a eficiência desse processo de transição que envolve uma estrutura gerada a partir de CA, desenvolveram-se duas sequências de procedimentos, buscando vincular o sistema generativo a uma plataforma BIM e a um aplicativo de análise estrutural, ambas ferramentas destinadas aos estágios mais avançados do processo de projeto. Tendo em vista que as rotinas de programação foram produzidas dentro da plataforma gráfica Rhinoceros 3D (McNell, Inc.), utilizou-se ferramentas de código aberto desenvolvidas por Mirtschin (2014) e o Structural Analysis Toolkit (Autodesk, Inc), a fim de conectar o sistema generativo produzido aos seguintes aplicativos:

- Revit, v. 2016 (Autodesk, Inc), plataforma BIM, cuja referida versão incorpora as versões Architecture, Structure e MEP;
- Robot Structural Analysis Professional, v. 2015.

Por meio da ferramenta *ggKarambaExport* o processo de otimização obtido com a ferramenta *OptimizeCrossSection* do Karamba3D pode ser exportado para qualquer plataforma BIM de maneira instantânea. A partir de uma chave booleana do tipo (*True/False*) cada candidato a solução estrutural produzido a partir do sistema generativo torna-se um arquivo do tipo IFC, passível de ser operado dentro do Revit e que contém as informações sobre a estrutura desenvolvidas no ambiente virtual de pesquisa da forma: materiais, apoios, carregamentos, e assim por diante. Assim, a cada iteração do sistema generativo que produz um candidato a solução de projeto é ligado ao interruptor booleano, gerando um arquivo IFC correspondente a ser trabalhado dentro da plataforma integrada de projeto. No *Quadro 26* mostram-se os resultados da integração entre essas plataformas a partir do sistema generativo baseado em CA.

Quadro 26: Integração entre o sistema generativo e as plataformas integradas de projeto.



Fonte: Autor.

O Structural Analysis Toolkit é um add-on que pode ser instalado no Revit e permite o fluxo de arquivos entre este aplicativo e o aplicativo Robot, que é um ambiente para análises estruturais mais aprofundadas. Com o Robot, outras ordens de análises podem ser produzidas considerando os deslocamentos horizontais provenientes de cargas de vento. Embora seja

possível inserir cargas horizontais diretamente no Karamba3D, as análises mais acuradas permitiram considerar efeitos mais específicos do campo da Engenharia Civil, considerando efeitos da condição última e de serviço.

A desvantagem desse processo seria a impossibilidade de inverter a ordem das ações trazendo novamente o modelo para o âmbito das iterações do CA, já que, a cada nova iteração, outras configurações de barras vão sendo produzidas respondendo de maneira diferente ao mesmo contexto de ações. Como o processo generativo consiste sobretudo em gerar candidatos, a incorporação de algumas variáveis fixas é possível, como a definição de uma seção transversal fixa, independentes de qualquer estrutura gerada. No entanto, uma grande vantagem desse processo é permitir a comunicação direta entre os profissionais e, no contexto atual, os produtos de um sistema generativo têm de atentar para sua compatibilidade para com os arquivos IFC.

Capítulo Sete

Geração de estruturas



A mensagem composicional da Alhambra é, seguramente, que a complexidade é mais satisfatória se construída sob uma ordem.”

——— C. MOORE, W. MITCHELL, W. TURNBULL 2001

Ao Trecho do livro *The Poetics of Gardens*, em que estes autores analisam a composição dos jardins da Alhambra, na Espanha..

Embora os currículos das escolas de arquitetura sejam formados por muitas disciplinas, parece inquestionável que as disciplinas que envolvem a prática de projeto são as mais importantes, pois, a partir delas, se realiza a síntese dos conhecimentos adquiridos nas outras disciplinas. Dentro desse contexto, o ensino de estruturas para futuros arquitetos pode estar muito mais ligado ao dimensionamento estrutural do que propriamente ao design estrutural e a diferença desses dois conceitos é notória. Embora o pré-dimensionamento seja assunto tratado nos estágios de concepção de uma forma projetual, o dimensionamento, propriamente dito, não o é. Em muitos casos, pré-dimensionar um pilar não tem grandes relações com o ato de criar uma estrutura. O design estrutural é justamente esta última ação e, enquanto pensamento, não pode estar desvinculado do raciocínio sobre uma forma.

Nos projetos que envolvem superfícies pouco usuais e que, em geral, resultam em estruturas de elevada complexidade, o design estrutural tem ainda mais preponderância. Isso porque incrementar o número de elementos ou variáveis em uma estrutura quase sempre prejudica os

aspectos cognitivos que permitem que um projetista aprenda e utilize a sua heurística para solucionar problemas. É claro que os processos *bottom-up* que envolvem sistemas generativos e blocos construtivos possuem limitações e estão longe de garantir a estabilidade estrutural em qualquer instância. Contudo, este modo de pensamento impede que uma forma arquitetônica seja concebida sem uma preocupação estrutural, o que, pelo menos em princípio, aumenta as chances de uma relação harmônica entre forma e estrutura.

Neste capítulo se buscará desenvolver exercícios de projeto a partir dos princípios mostrados nos capítulos anteriores a fim de extrair conclusões sobre as potencialidades da aplicação deste tipo de pensamento ao design estrutural e, por consequência, ao projeto arquitetônico. Com a pretensão, portanto, de introduzir uma ferramenta alternativa ao design estrutural, que possa auxiliar na solução de problemas não só nos processos paramétricos de projeto, se buscou estabelecer parâmetros de comparação dentro de alguns exercícios de projeto, buscando possibilidades e desdobramentos para este método, enquanto um novo instrumento.

7.1 VALIDAÇÃO

A fim de identificar, de maneira comparativa, potencialidades e limitações no método desenvolvido, propuseram-se dois exercícios de projeto, ambos utilizando o sistema generativo baseado em CA. O delineamento dos dois exercícios consistiu em estabelecer dentro de um mesmo espaço de busca duas abordagens diferentes para o processo projetual de uma estrutura. A primeira delas buscou identificar implicações do processo generativo *bottom-up* em formas pré-definidas e de elevada complexidade. O segundo buscou averiguar potencialidades de um processo generativo como uma ferramenta única de busca da solução, deixando a forma do edifício como um resultado da configuração estrutural.

O exercício nº 1, *semi bottom-up*, foi orientado por formas diretrizes. Essas formas definiram a envoltória do edifício e, para fim de observação, foram utilizadas formas complexas obtidas por processos de modelagem paramétricos. O Exercício N. 2, completamente *bottom-up*, foi orientado por intervalos numéricos. A partir da extensão de dados, foram pesquisadas formas para uma estrutura como um resultado do processo generativo dentro dessas extensões numéricas. Nos dois casos, utilizou-se os procedimentos desenvolvidos, considerando blocos construtivos, restrições formais, condições de estabilidade e orientação à fabricação.

Para os dois exercícios estabeleceu-se um problema projetual com as mesmas características, a fim de permitir extrair conclusões sobre a operacionalidade do sistema generativo em uma situação de projeto. Em geral, as estruturas com muitos elementos são utilizadas nas situações de projeto que necessitam de vãos médios e grandes, produzindo vários “caminhos” para as cargas na estrutura e, conseqüentemente, elementos mais esbeltos. A utilização de estruturas de poucos elementos em grandes vãos conduzirá, necessariamente, a elementos estruturais densos e de grandes seções transversais. O problema proposto envolve a geração de estruturas para um galpão, sem uma funcionalidade concretamente definida, mas que possuem os seguintes pré-requisitos a serem cumpridos pela estrutura:

- Estar incluída em uma envoltória de aproximadamente 30 metros x 30 metros x 10 metros, com algumas variações nessas dimensões em virtude da utilização de formas não regulares;
- Cobrir todo o vão do plano XY dentro dos limites propostos, isto é, sem a presença de pilares internos à estrutura periférica;
- Ser contínua e sem elementos externos.

A questão central a ser discutida e avaliada são as propriedades do sistema generativo enquanto ferramenta para a pesquisa da forma estrutural dentro do contexto do projeto arquitetônico. Tendo em vista a definição de barras estruturais a partir de blocos construtivos prismáticos, as estruturas geradas serão reticuladas, compostas por barras metálicas descrevendo as arestas dos sólidos e cujas conexões estão posicionadas nos nós. Além disso, questões relacionadas à viabilidade e fabricação serão consideradas por meio dos procedimentos propostos no método:

- Tempo, em gerações, para se obter os candidatos a solução;
- Viabilidade estrutural, número de barras e conexões;
- Adaptação da solução aos ambientes propostos;
- Possibilidade de conjugação dos CA com outros métodos paramétricos de projeto.

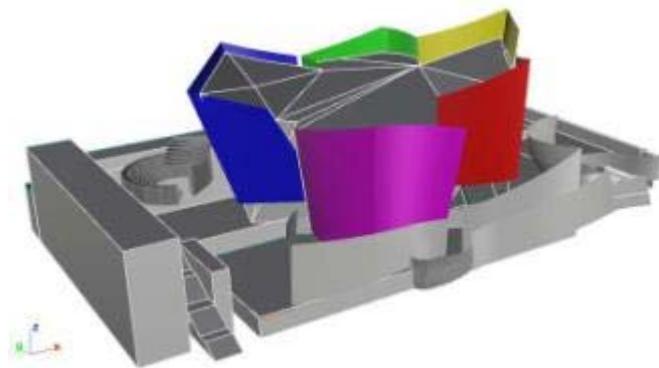
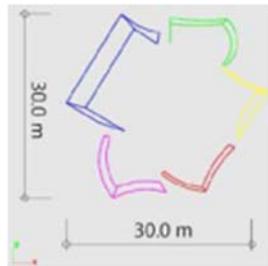
Visando avaliar as propriedades generativas em situações onde a forma arquitetônica sugere contornos complexos para as estruturas, no exercício nº 1 se utilizaram formas diretrizes complexas apropriadas do projeto do arquiteto Frank Gehry para o Walt Disney Concert Hall, em Los Angeles. Composto por superfícies curvas produzidas em aço inoxidável, o edifício ficou conhecido no âmbito da arquitetura por sua complexidade não só de formas, mas de

processos envolvidos para a viabilidade das mesmas. Um desses processos foi o design estrutural, no qual os elementos de barras foram pensados e produzidos em adaptação a essas formas (*Quadro 27*).

Quadro 27: Espaço de busca do exercício nº 1.

Exercício nº 1

Formas diretrizes



Geração 30

Geração 42



Geração 67

Geração 81

Fonte: Autor.

O enfoque do exercício no 1 foi analisar como o sistema generativo é capaz de construir a estrutura de maneira automatizada e buscar alternativas para se adaptar às formas pré-estabelecidas. Ao se estabelecer superfícies diferentes no mesmo conjunto, o autômato se depara com diferentes curvaturas em relação aos eixos X, Y e Z. Tendo em vista que os blocos construtivos são sempre rígidos, isto é, de dimensões fixas, os centroides foram dispostos em dois planos paralelos às 5 superfícies em questão, distantes horizontalmente das mesmas a 1 e 3 metros, respectivamente, no plano horizontal situado na cota $Z = 0$. Os centroides considerados válidos como elemento estrutural foram determinados a partir da distância em X do nó estrutural em relação à superfície mais próxima. Para qualquer nó n do bloco construtivo que estiver distante até 4 metros da superfície ($0 < n < 4$) o centroide correspondente pode ter suas linhas seccionadas pela superfície.

No exercício no 2 procurou-se estabelecer um espaço de busca semelhante, preenchendo os mesmos requisitos de projeto estabelecidos, mas com o espaço de busca não delimitado por formas, e sim por domínios numéricos. Esses domínios foram estabelecidos utilizando os

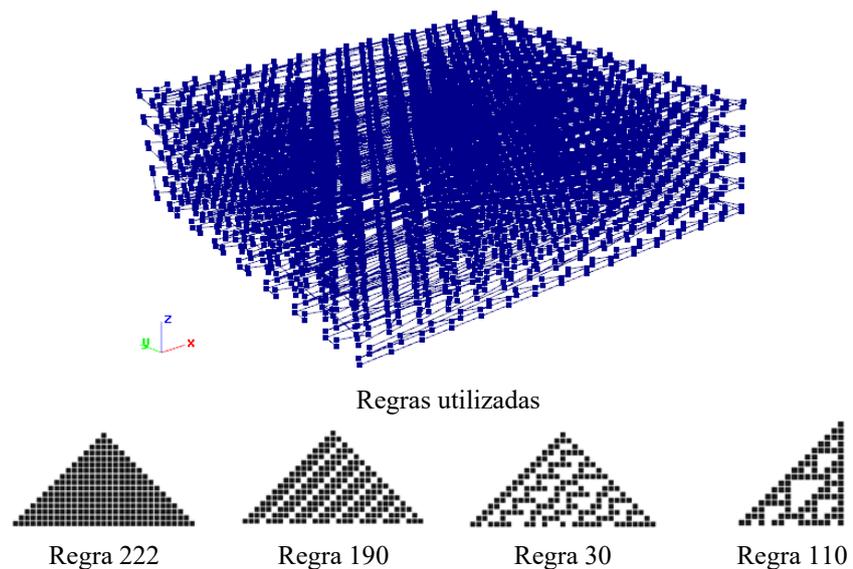
padrões gráficos presentes em algumas regras de CA_{1D}, as quais produziram diferentes condições para a busca da solução. Seguindo a ideia do método proposto, a quantidade de blocos construtivos dentro da envoltória de busca da solução é função da relação entre o tamanho da envoltória e o tamanho do bloco construtivo. Desse modo, a quantidade de blocos construtivos e, conseqüentemente, de centroides, será fixa, tal como o conjunto de poliedros do Watercube.

A fim de tornar essa quantidade de blocos variável, vinculou-se a quantidade de células produzidas nas gerações de um CA_{1D} fundamental ($k = 2, r = 1$) às quantidades de centroides dentro da envoltória. Assim, ao utilizar as gerações de uma regra que produz um padrão de células fixo, como a Regra 222, todos os centroides serão preenchidos na estrutura periférica da envoltória. Já as gerações de outros padrões gráficos, como os produzidos pelas Regras 190, 30 e 110, permitem explorar outras disposições, como os padrões periódicos, complexos e caóticos. Além disso, as quantidades de blocos construtivos de uma camada de estrutura foram também definidas pelo número de células da geração e por um fator de escala correspondente. Tomando a dimensão linear dos 30 metros, a quinta geração produz uma fileira de 10 centroides e, com a Regra 222, todos eles são preenchidos por blocos construtivos (*Quadro 28*).

Quadro 28: Espaço de busca do exercício nº 2

Exercício nº 2

Espaço de busca definido por pontos



Fonte: Autor.

O enfoque do exercício n. 2 foi analisar como um sistema sem uma forma pré-definida pode atuar como ferramenta de projeto na construção da solução. Para isso a estratégia utilizada foi utilizar um tipo de atomato em cada uma das faces da envoltória, alterando o tipo de regra à

medida que análises estruturais foram sendo efetuadas. A Regra 222 preenche todos os centroides da solução e, desse modo, quando a análise estrutural fornece a informação sobre a necessidade de inserção de outros elementos estruturais, devido a deformações excessivas, este CA passa a ser o utilizado nessa solução. Por outro lado, quando as deformações dos elementos se aproximam de zero, uma das outras três regras pode ser utilizada.

7.1.1 Exercício nº 1

No Exercício No 1 foram testadas algumas formas de preenchimento baseadas nos tipos de regras. A predefinição de formas para posterior adaptação da estrutura não favorece a geração de uma estrutura aparentemente aleatória, justamente porque a forma dirige a solução. Nesse caso, no qual se utilizou um bloco elementar único, tanto nos locais delimitados por superfícies sinuosas quanto nas paredes ortogonais, a estrutura acaba sendo entendida por seu bloco elementar e a forma acaba sendo necessária para a apreensão completa da solução.

No entanto, a exploração desse sistema de geração estrutural apresenta algumas vantagens. Uma delas é que, ao se mudar a solução formal, as células se adaptam automaticamente à nova configuração, mantendo a mesma sequência construtiva da estrutura. Assim, do mesmo modo que a sistema estrutural funciona como um suporte às formas arquitetônicas, o sistema generativo estrutural também passa a funcionar com um suporte ao design paramétrico, por vincular uma condição à outra.

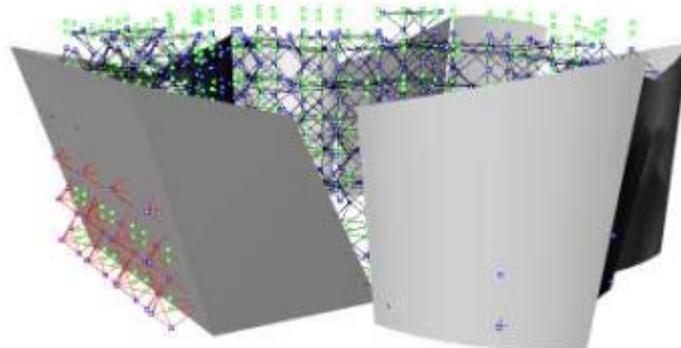
Por meio da diferença de formas é possível observar a utilidade da automatização da estrutura por meio do sistema generativo. O procedimento paramétrico utilizado no edifício Disney Concert Hall, que também é amplamente utilizando no ambiente de modelagem paramétrica, prevê uma sequência que envolve: 1) definição da forma; 2) geração de uma malha (*mesh*) dentro de domínios numéricos paramétricos, de modo a alterar a quantidade de linhas diretrizes dentro da superfície e; 3) geração de elementos estruturais a partir das linhas. Pode-se dizer que essa sequência tem uma eficiência inequívoca ao se determinar elementos estruturais pertencentes a uma superfície, como é o caso das *gridshells* e dos *diagrids*. Contudo, nos casos como o do Disney Concert Hall, em que diversas formas se agregam dentro de um mesmo conjunto estrutural, estratégias desse tipo apresentam inconvenientes facilmente superados no método que envolve sistema generativo e bloco elementar.

Uma das maiores dificuldades de se propor uma estrutura contínua que contemple muitas formas em uma mesma solução é conciliar a gerir os elementos que, em geral, apresentam alturas e inclinações distintas, praticamente inviabilizando a sua concepção sem elementos de ligação adicionais. Nos casos em que a estrutura não fica aparente, esses elementos são facilmente escondidos, não participando efetivamente da solução visual do conjunto. Mas se a estrutura participa da solução de arquitetura, então conciliar estes elementos dentro da solução de design estrutural passa a ser um requisito de projeto.

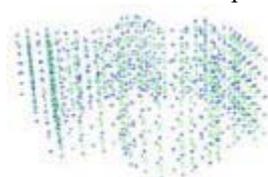
Nesse caso, o sistema generativo proposto elimina essa questão, uma vez que somente os blocos construtivos completos participam da solução. As barras e os nós que ultrapassam as superfícies são automaticamente excluídos da solução e a partir dos centroides restantes pode-se explorar a solução por meio do CA. Além disso, em cada camada disposta ao longo do eixo z pode-se utilizar diferentes regras, explorando a solução de diferentes maneiras. Ao se utilizar a regra 222, por exemplo, todos os centroides serão substituídos por um bloco elementar. Uma situação mais interessante é propor a utilização da Regra 242 em alguns setores, a fim de intercalar regiões com mais ou menos elementos estruturais (*Quadro 29*).

Quadro 29: Estrutura obtida no exercício nº 1

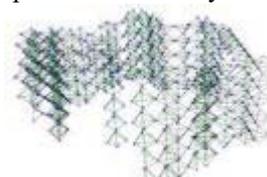
Exercício nº 2 Espaço de busca definido por pontos



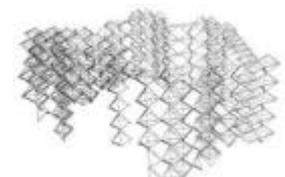
Sistema generativo construindo uma estrutura para as superfícies do Disney Concert Hall



Espaço de busca da solução: centroides



Substituição dos centroides por blocos elementares



Geração de elementos estruturais: barras e nós

Fonte: Autor.

A utilização de um bloco elementar prismático, com arestas de dois metros, impede a geração de estruturas de barras com inclinações inferiores a 30°. Além disso, dentro do contexto de

solicitações utilizado nesta pesquisa, exclusivamente de cargas gravitacionais, as barras também não apresentaram índices de esbeltez significativos, capazes de conduzir a uma instabilidade estrutural. Ao se definir blocos construtivos, em geral, buscam-se configurações geométricas estáveis, como soluções trianguladas ou sólidos convexos. A definição de outros tipos de blocos pode conduzir a outros cenários e, neste caso, os procedimentos de análise sobre a inclinação e a esbeltez devem ser observados antecipadamente, a fim de evitar mudanças nas etapas de dimensionamento.

Nos espaços em que a estrutura perfura a forma, estabeleceram-se procedimentos adicionais, para que os elementos fossem seccionados. Por meio de instruções paramétricas simples, as linhas foram cortadas pela superfície envoltória. Outras estratégias são possíveis, como a utilização de linhas adicionais ligando os nós mais próximos às superfícies, por meio de linhas perpendiculares. Do ponto de vista da modelagem computacional, a primeira estratégia é mais simples, pois requer um número reduzido de procedimentos. Já a segunda estratégia permite utilizar um número menor de barras, como uma estrutura secundária de ligação, apenas com a função de ligar o sistema estrutural às superfícies.

Quando se deseja que a estrutura descreva perfeitamente a forma proposta, a estratégia mais adequada é propor um conjunto de blocos elementares, cujos vértices toquem a forma proposta, ou, pelo menos, que as ultrapassem. Isso permite que os procedimentos que envolvem a retirada de elementos geométricos, por meio de sua exclusão parcial ou completa, sejam menos trabalhosos do que a inserção de um novo elemento não previsto anteriormente. Ao se propor uma estrutura de ligação, elementos novos e sem relações geométricas estabelecidas previamente surgem como uma alternativa não vinculada à ideia inicial *bottom-up*.

Nos casos em que existem vários nós conectando a forma, ainda é possível explorar uma configuração estrutural do tipo tiling, para as fachadas do edifício. Como já mencionado, essa estratégia ganha mais sentido ao se propor elementos estruturais aparentes, embora seja possível que algumas das alternativas obtidas apresente uma elevada eficiência estrutural enquanto elemento enriquecedor para a superfície. Como a estrutura do Disney Concert Hall não é aparente, utilizou-se os dois procedimentos para a definição da estrutura periférica: 1) definição de duas camadas de estrutura realizando o corte das linhas que interceptam a superfície; 2) inserção de linhas adicionais perpendiculares à superfície, a fim de conectar a fachada à estrutura. A comparação entre as duas alternativas pode ser observada em uma das superfícies

utilizadas neste exercício, na qual a Regra 222 foi utilizada para o preenchimento completo de todos os blocos elementares (*Figura 88*).

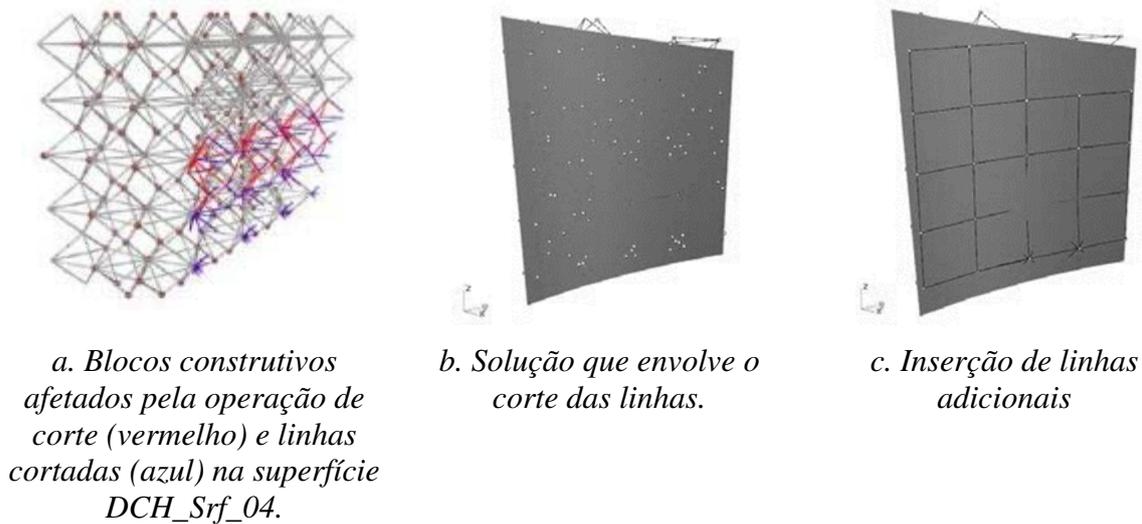


Figura 88: Solução para a estrutura gerada no exercício nº 1. Fonte: Autor.

A utilização das análises estruturais, neste caso, passa a ser um procedimento posterior à definição da estrutura, embora ainda seja possível interromper o processo iterativo, analisar a estrutura e retomar o processo. Contudo, em uma abordagem de projeto com fortes características *top-down*, como é o caso do Disney Concert Hall, as análises estruturais são realizadas como uma técnica para a solução de um problema de projeto; neste caso, a estruturação da forma. Portanto, as decisões com relação à geometria estrutural possuem uma preponderância menor dentro do problema de arquitetura, sendo delineadas quase que exclusivamente por uma questão de engenharia.

Ainda assim, o sistema generativo proposto acaba trazendo algumas implicações positivas para o design estrutural, por gerar estruturas rapidamente com um elevado grau de repetição de elementos sem, contudo, estar associado a uma repetição de formas. Por meio das análises estruturais realizadas ainda nos estágios de concepção estrutural, é possível observar que o conjunto de blocos elementares apresenta deformações reduzidas dentro do contexto de ações gravitacionais proposto. A conexão do modelo com as plataformas integradas de projeto permite que as condições de estabilidade possam ainda ser aprimoradas a partir das técnicas de otimização estrutural, em geral, modificando as seções dos perfis (*Figura 89*).

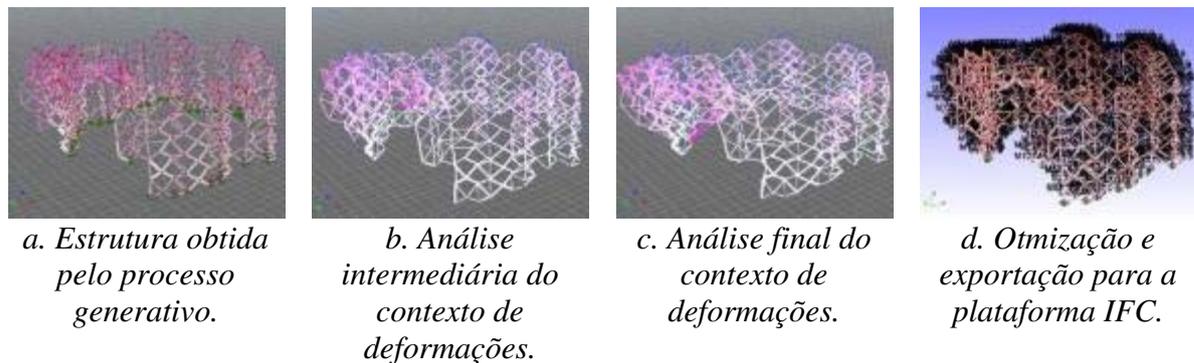


Figura 89: Obtenção e análise da estrutura do exercício nº 1. Fonte: Autor.

Desde a década de 1990, as contribuições de um processo paramétrico para as abordagens de projeto *top-down* têm sido inequívocas, justamente por viabilizarem a produção de formas complexas, tanto nos ambientes digitais de modelagem quanto para sua fabricação. Além da geração de alternativas de soluções projetuais através de sistemas algorítmicos, os sistemas generativos também podem ser entendidos como uma ferramenta capaz de solucionar problemas de geometrias pré-definidas e complexas. No caso específico do design estrutural, a geração da solução passa a ser considerada um processo simultâneo à pesquisa da forma, produzindo um ambiente de trabalho efetivamente colaborativo entre os profissionais, cujas soluções de fato se concluem conjuntamente.

7.1.2 Exercício nº 2

No exercício no 2 buscou-se utilizar formas de preenchimento baseadas nas mesmas regras e nos mesmos blocos elementares utilizados no exercício anterior. A diferença entre os dois exercícios refere-se aos espaços de busca da solução. Neste exercício, ao invés de formas predefinidas, foi utilizado um espaço numérico que definiu o número máximo de centroides dentro da envoltória de 30 x 30 x 10 metros, utilizando o mesmo bloco elementar tetraédrico com arestas iguais de dimensão igual a dois metros. Isso permitiu espalhar dentro da envoltória 4.960 centroides, correspondendo ao mesmo número de blocos elementares caso todos fossem utilizados na solução estrutural.

Contudo, a partir das regras mencionadas - fixa, periódica, complexa e caótica - buscou-se aproximar a solução produzida neste exercício com a solução produzida no exercício anterior, isto é, obtendo estruturas periféricas, com elementos que pudessem sugerir uma superfície de

fechamento. Desse modo, considerou-se apenas os centroides próximos a superfície da envoltória como iteráveis, descartando os pontos distantes das superfícies.

Diferentemente de uma abordagem tradicional de projeto, na qual se define a estrutura em função de uma forma determinada, a utilização do modelo proposto, neste caso, partiu de duas estratégias básicas: iteração de regras e análises estruturais. As regras foram utilizadas como um mecanismo de preenchimento do espaço de centroides e, dependendo de seu padrão geométrico, inserem mais ou menos sólidos na solução. Ao longo do preenchimento, análises estruturais utilizando as rotinas de programação desenvolvidas foram sendo sistematicamente realizadas, de modo a identificar regiões com maior ou menor índices de deformação. Nos setores onde a deformação foi considerada excessiva, foram utilizadas regras que produzem um maior número de células vivas, provendo, assim, mais sólidos àquela região. Por outro lado, nos setores onde pouca deformação foi verificada, regras como menos células vivas passaram a ser utilizadas.

Mesmo com essas estratégias, foi preciso selecionar as regras e o ponto de início do processo iterativo. O processo foi iniciado em uma das extremidades, em um ponto onde o centroide coincide com a origem (0, 0, 0). A partir daí a iteração seguiu o sentido anti-horário da camada mais inferior para a mais superior. Na sequência de preenchimento, utilizaram-se as regras 222, 190, 30 e 110 a cada cinco gerações de células e, partir daí as gerações foram selecionadas com base nas análises estruturais produzidas a cada inserção de 20 blocos elementares (*Quadro 30*).

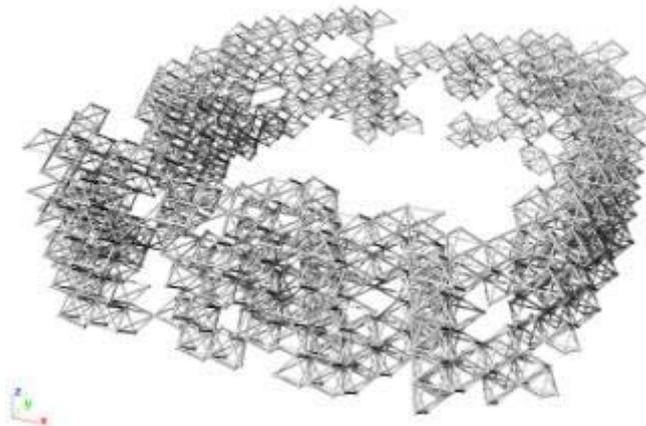
Com um domínio numérico que determinou quais eram os pontos em que a estrutura podia atuar, havia um delimitador que dirigia o sistema generativo - neste caso, a superfície da envoltória. Desse modo, o projetista pode excluir os centroides antes de iniciar o processo iterativo, de modo que os blocos elementares só sejam posicionados nos locais pré-definidos, isto é, que contem pontos. Assim, um projetista pode, por exemplo, excluir os pontos de coordenadas XYZ, prevenindo que estes locais sejam preenchidos com elementos estruturais. O sistema não atua isoladamente na construção da solução, pois, se assim o fosse, muitos centroides do interior do espaço de busca seriam preenchidos por blocos elementares, impedindo a criação de um vão livre, por exemplo.

Por ter utilizado o mesmo bloco elementar do experimento anterior, este sistema também impede a geração de estruturas de barras com angulações inferiores a 30° e demasiadamente esbeltas. Além disso, este método apresenta uma vantagem com relação à manipulação dos

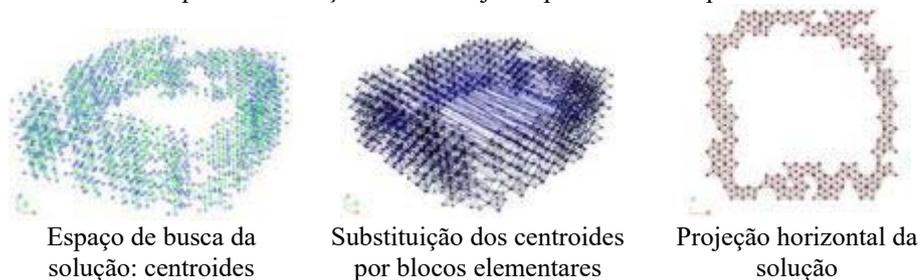
blocos elementares e à solução global da estrutura. Tendo em vista que os resultados parciais da estrutura vão sendo observados periodicamente, pode-se garantir que mesma não apresentará descontinuidade de elementos. Ao se utilizar uma regra que promove um espaço descontínuo e prejudicial à eficiência estrutural do conjunto, pode-se retroceder à geração anterior, substituindo-a por outra, gerada por uma regra diferente.

Quadro 30: Estrutura obtida no exercício nº 2.

Exercício nº 2 Espaço de busca definido por pontos



Sistema generativo construindo uma estrutura pseudoaleatória, a partir da iteração de um conjunto predefinido de pontos.



Fonte: Autor.

Neste tipo de estratégia, a definição de uma superfície que passa pelos nós da estrutura é uma alternativa para a vedação da estrutura. Isso poderia ser efetuado propondo curvas interpoladas capazes de compreender os nós situados na borda da estrutura. Desse modo, as barras dessa região poderiam ser excluídas dando lugar a elementos curvos, que são as seções das curvas propostas. O ETFE, utilizado no edifício do Watercube, é um material flexível que poderia ser utilizando no fechamento dessa estrutura (*Figura 90*).

Por outro lado, este exercício abre uma perspectiva diferente em relação ao anterior, que é a possibilidade de avaliar a estrutura constantemente ao longo do processo iterativo. Embora isso também seja possível quando se limita o espaço de busca por meio de uma forma, de algum modo, o conjunto de blocos elementares fica condicionado a cumprir os contornos

preestabelecidos. Portanto, mesmo com uma abordagem generativa, as análises no exercício nº 1 têm muito mais um propósito de viabilizar as soluções propostas do que propriamente investigar uma solução adequada. O que se pode afirmar é que os aspectos produtivos são, de fato, beneficiados pela utilização de blocos elementares, pelo menos em relação à repetibilidade dos elementos.

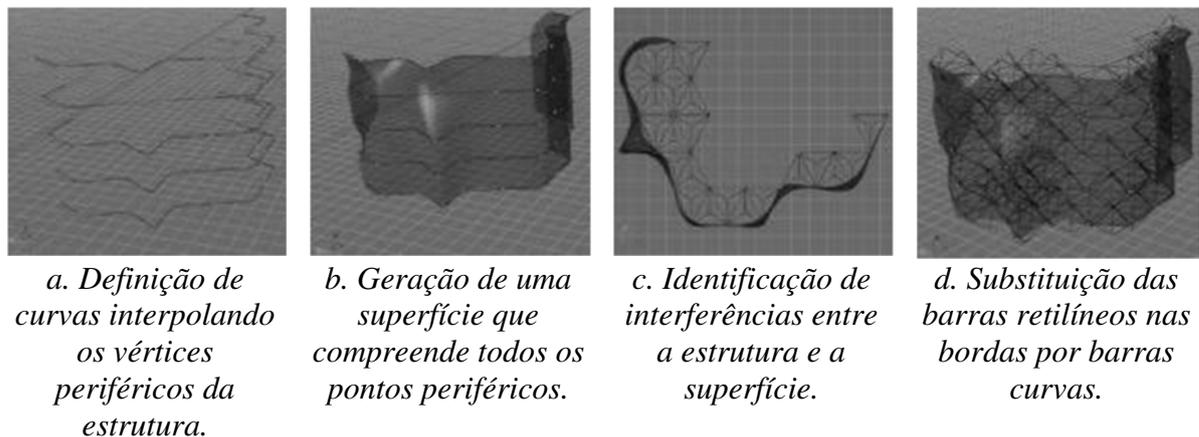


Figura 90: Definição de uma superfície suportada pela estrutura obtida no exercício nº 2. Fonte: Autor.

Com a possibilidade de alterar a solução sem preocupações com a forma final da estrutura, este exercício permitiu que a construção da solução acontecesse de diversas maneiras, observando o comportamento estrutural em vários setores. Alternativamente à construção da solução preenchendo centroides fileira por fileira, isto é, de baixo para cima, é possível construir o conjunto começando pelas laterais, por exemplo. Com o auxílio da análise estrutural instantânea, a solução vai sendo gerada observando os pontos de maior deformação e preenchendo essas regiões com mais blocos elementares. Além disso, outras variáveis como o número de apoios podem ser controladas também durante o processo iterativo (*Figura 91*).

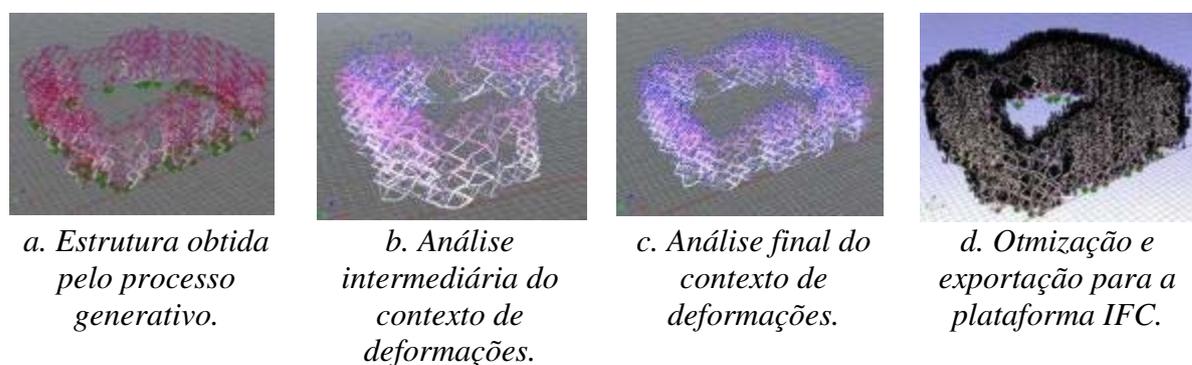


Figura 91: Obtenção e análise da estrutura do exercício nº 2. Fonte: Autor.

A utilização de um modelo com essas características aumenta a possibilidade da inserção de outras variáveis durante a construção da solução de projeto e não somente testando modelos completos. Contudo, para que esta noção seja efetivamente implementada, é necessário o desenvolvimento de alternativas não somente paramétricas, mas, de fato, generativas. Neste caso, estabelecer um sistema somente paramétrico pode não ser suficiente para as avaliações em estados intermediários da solução pois, além de permitir que alternativas flutuem dentro de um conjunto de argumentos, o sistema tem que prover mecanismos para que a pesquisa da forma continue apesar das mudanças no processo.

Além disso, é necessário que estas mudanças possam ser incorporadas em outras instâncias do processo de projeto, que envolvem outros profissionais dentro de plataformas integradas. Desse modo, a conexão do sistema generativo com ferramentas de análises estrutural mais avançadas permitem efetuar o dimensionamento de partes da estrutura fornecendo respostas prévias capazes de auxiliar no processo de concepção da forma. Nos processos de dimensionamento, modelos de análise mais avançados permitirão que outras ações sejam consideradas durante a investigação da forma e que a solução promovida durante os estágios iniciais de projeto se aproxime mais da solução final da estrutura.

Em qualquer dos casos, nas primeiras formas obtidas no design estrutural o método proposto pode induzir a decisões mais acertadas em relação aos aspectos de estabilidade estrutural. Além disso, sua vinculação a aplicativos de design gráfico consolidados na prática de projeto dos arquitetos contribui com a utilização das análises estruturais pelos próprios projetistas já que, em grande parte das vezes, a utilização de um aplicativo de análise estrutural requer conhecimentos avançados sobre dimensionamento.

Capítulo Oito

Conclusão

“

Onde fica a saída? Perguntou Alice ao gato que ria. Depende... respondeu o gato. De quê? Replicou Alice. Depende de para onde você quer ir...”

——— LEWIS CARROLL, 1865
Trecho do livro Alice no País das Maravilhas.

As ideias matemáticas identificadas nos estudos de caso possuem duas considerações amplas em seu conceito central. Uma delas é a ideia de preencher o espaço utilizado componentes repetitivos e a outra é a ideia de simetria. A repetição de blocos construtivos representa um método que permite subdividir o espaço indefinidamente, ao mesmo tempo que o mantém regular e racional. A simetria é uma das operações Euclidianas mais tradicionais e, nos estudos realizados, foi utilizada de diversas maneiras, com as simetrias rotacionais, translacionais e bilaterais. Essas duas estratégias, que são facilmente percebidas em elementos de diversas ordens arquitetônicas, tendem a ser suprimidas na arquitetura contemporânea, por ferramentas que expandem o poder de cognição do projetista.

A abordagem de projeto utilizada na concepção da estrutura do Watercube, que foi caracterizada por pesquisadores como Burry e Burry (2012) como uma estratégia de empilhamento, é visualizada no cotidiano a todo tempo. No exemplo destes autores, o

empilhamento de laranjas, por exemplo, sugere uma espécie de mosaico em três dimensões composto de tetraedros que não se encontram, pois estão intercalados pelas próprias laranjas, que, neste caso, são as células manipuláveis dessa subdivisão tridimensional. As laranjas podem ser perfeitamente interpretáveis em um contexto arquitetônico como esferas de tamanhos variados e, ao se controlarem os tamanhos com uma função do tipo escala, pode-se produzir tetraedros de tamanhos diferentes utilizando o parâmetro “fator de escala” como um elemento informacional de ligação entre eles.

No design estrutural existe uma longa tradição na utilização da repetição de elementos geométricos regulares para a obtenção de elementos estruturais, como as treliças mais usuais. Sob esse ponto de vista, pode-se dizer que a estrutura do Watercube apresenta o mesmo princípio, pois, de maneira idêntica, repete sempre os mesmos elementos. Se fossem utilizados os mesmos princípios de triangulação comumente empregados na concepção de treliças, resultados complexos seriam obtidos, desde que a disposição de barras sugerisse uma composição pseudoaleatória. Neste caso, portanto, pode-se entender a definição matemática envolvida como uma ferramenta de controle para todo o processo. Se ao invés de dodecaedros e tetradecaedros fossem utilizados tetraedros, os aspectos relacionados à regularidade dos elementos – como a distância entre vértices, por exemplo – seriam utilizados como os parâmetros manipuláveis da modelagem.

Já as subdivisões do espaço plano como o Diagrama de Voronoi, que propõe a interseção de mediatrizes de segmentos definidos a cada par de pontos, estão entre as estratégias mais exploradas dentro do contexto da modelagem paramétrica. Este conceito também pode ser expandido para o espaço tridimensional. A construção Pinwheel Tiling é um processo parecido, mas com um viés bem distinto, pois, enquanto a divisão Voronoi geralmente parte de um conjunto de pontos dispostos de maneira pseudoaleatória, a divisão utilizada no Pinwheel Tiling, como visto no caso do Fedsquare, parte de uma rede de pontos cartesianos muito bem definida.

Pelos estudos de caso realizados, é possível concluir que as abordagens utilizadas no Watercube e no Fedsquare têm congruência no que diz respeito ao das estratégias de projeto utilizadas. Diferentemente do caso do Voronoi, não há espaço nestes casos para a variabilidade ou assimetrias nos estágios iniciais de concepção. Nestas etapas, são empregados parâmetros fixos, rigidamente definidos e, somente a partir deles, outras ideias menos racionais, como a escolha

de um ângulo de rotação para a Espuma Weaire-Phelan ou a seleção de barras a serem excluídas da Construção Pinwheel Tiling, foram inseridas no processo.

Por outro lado, estabelecer parâmetros que consideram ao mesmo tempo a forma e a estrutura do edifício pode conduzir a um espaço de exploração de soluções poderoso, no qual as alternativas geradas têm de ser necessariamente integradas. No projeto de estruturas de elevada complexidade essa integração ganha preponderância, pois as decisões projetuais que afetam a estrutura afetam também suas muitas variáveis e, conseqüentemente, muitas partes dos outros sistemas. Observar os projetos nos quais a estrutura é também um componente estético da arquitetura permitiu atestar que a solução conjunta vai além da estética e promove o fluxo de conhecimentos específicos de outras disciplinas nos estágios criativos do processo de projeto.

Por meio do método proposto nesta pesquisa, buscou-se identificar como essa integração pode ser feita propondo não somente o objeto arquitetônico como um todo, mas também atuando criativamente em suas partes e na relação entre essas partes e o todo. Isso tem permitido que questões mais avançadas sejam exploradas nos ambientes de modelagem paramétrica, pois, da mesma maneira que em um aplicativo computacional, os parâmetros são instâncias intermediárias de uma funcionalidade maior, que, muitas vezes, não está claramente definida. Atualmente, projetos que utilizam sistemas capazes de responder e se adaptar às questões ambientais têm necessariamente que prever tanto as instâncias intermediárias como a solução global.

A partir da primeira década dos anos 2000, quando as ferramentas paramétricas se tornaram mais comuns nos processos projetuais de arquitetura, pensar parametricamente significava quase sempre subdividir uma forma em inúmeras partes, manipulando-as a fim de obter resultados diferentes do inicial. Pensar de maneira *bottom-up* força o projetista a estabelecer relações entre os componentes iniciais. Os autômatos celulares são um meio facilitador para isso pois, além de permitir computar questões mais abstratas, fornecem um retorno gráfico instantâneo. Assim, de maneira cadenciada, essas relações podem ser observadas e modificadas, e todas as alterações são incorporadas e verificadas sem a necessidade de reconstrução do sistema.

O método algorítmico proposto pode ser entendido como uma aproximação a outras formas de pensamento sobre o design de estruturas. As possibilidades para a implementação de noções sobre o comportamento estrutural em plataformas paramétricas de projeto não se encerram nas

questões exploradas nesta pesquisa. Além disso, estabelecer formas para a exploração de soluções a partir de uma base numérica de dados abre a possibilidade de computação de outras variáveis na composição do problema. Os modelos que emergem de considerações prescientes sobre o comportamento estrutural permitem a conjugação, com menores obstáculos, de intencionalidades aparentemente distintas como a complexidade e a eficiência estrutural.

A exploração da noção *bottom-up* dentro do design estrutural ainda possui contornos complexos, mesmo quando se busca delinear essa complexidade por meio de componentes mais simples. No entanto, o efeito inequívoco dessa abordagem, principalmente dentro dos ambientes digitais de projeção, apresenta benefícios. Embora seja possível gerar uma estrutura complexa totalmente automatizada e baseada em regras, a versão iterativa do experimento, que trabalha em conjunto com uma ideia preestabelecida pelo projetista, parece ser uma estratégia mais promissora, porque garante que outras questões externas ao design estrutural, como o conforto ambiental, por exemplo, sejam resolvidas juntamente com o sistema estrutural.

Conforme afirma Tedeschi (2014), os processos de desenho tradicional não podem ser utilizados como uma ferramenta de projeto, quando se pretende prever respostas durante o processo. De maneira bem diferente, o método apresentado nesta pesquisa abre portas para a computação de questões que há bem pouco tempo não poderiam ser pensadas dentro das plataformas digitais de projeção. Realizar o processo *bottom-up* de investigação da forma com ferramentas que permitem prever situações de projeto confere mais liberdade a este método, aproximando-o dos modos de manipulações *top-down*, a fim de consolidá-lo como ferramenta de projeto.

O sistema generativo baseado em CA foi um método de investigação formal pelo qual houve grande interesse, em especial no período dos anos 90, pela comunidade do design computacional, notadamente por alguns dos pesquisadores que viriam a se tornar grandes nomes na área, como Batty, Coates e Frazer. Burry e Burry (2012, p. 8) comentam que, apesar do interesse dos arquitetos pelos métodos computacionais ter nascido naquela época, até o início dos anos 2000 havia apenas estudos teóricos e especulativos, que só viriam a se concretizar nas primeiras décadas do século XXI. Isso de fato ocorreu com os fractais e com os métodos de otimização, como os algoritmos genéticos. Contudo, no caso específico dos CA, essa concretização foi limitada. Dentre os projetos apresentados no livro *The New Mathematics of Architecture* apenas um, conforme já descrito acima, tem o uso de CA e, ainda assim, sua

aplicação restringe-se a uma composição bidimensional aplicada a uma fachada. A literatura levantada não mostra nenhum outro caso de edifício construído com o uso de CA.

Qual seria o motivo de todo esse interesse não ter conduzido a aplicações efetivas em arquitetura? Por que a única aplicação conhecida se restringe ao plano bidimensional? Seria ainda possível utilizar o CA como método generativo *bottom-up* para a produção de formas em arquitetura? Que ferramentas precisariam ser desenvolvidas para que os CA se integrassem ao processo de projeto dos arquitetos? Que vantagens haveria em se trabalhar com este sistema em comparação aos métodos de modelagem *top-down*? Talvez a resposta esteja no potencial que os CA possuem de geração de complexidade que, nos dias de hoje, já pode ser materializada com relativa facilidade por meio da fabricação digital, e que pode resolver questões de projeto como adaptação e resposta a quesitos funcionais sem a necessidade de padronização. Talvez a diferença seja que, nos anos 1990, partia-se dos CA buscando-se possíveis aplicações no campo da arquitetura e hoje, com o conhecimento produzido por esses pioneiros do Design Computacional, podemos partir de um problema concreto e resolvê-lo com o uso desse método.

Referências

ADAMATZKY, A. (Ed.). **Game of Life Cellular Automata**. Londres: Springer-Verlag, 2010.

ADRIAENSSENS, S.; BARNES, M. Tensegrity spline beam and grid shell structures. **Engineering Structures**, v. 23, n. 1, p. 29-36, jan. 2001.

AGKATHIDIS, A.; BROWN, A. Tree-structure canopy: a case study in design and fabrication of complex steel structures using digital tools. **International Journal of Architectural Computing**, v. 11, n. 1, p. 88-104, mar. 2013.

AHARONY, A.; GEFEN, Y.; KANTOR, Y. **Magnetic Correlations on Fractals**. **Journal of Statistical Physics**, v. 36, n. 5/6, p. 795-805, set. 1984.

ALDCROFT, D. H.; FREEMAN, M. (Ed.). **Transport in the Industrial Revolution**. **Manchester**: Manchester University Press, 1983.

AMBASZ, E. (Ed.). **Shigeru Ban**. Londres: Laurence King, 2001.

ARENAS, A.; FERNANDÉZ, A.; GOMÉZ, S. An optimization approach to the structure of the neuronal layout of *C. elegans*. **World Scientific Book**, v. 15, n. 46, p. 1-17, dez. 2008.

ASHBY, W. R. **Principles of the self-organizing system**. Emergence: Complexity and Organization, v. 6, n. 1-2, p. 102-126, republicação out. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR CB-02: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. Rio de Janeiro, 2011.

AUTODESK, INC. In: Autodesk. 2014. Disponível em: <<http://www.autodesk.com/>>. Acesso em: 20 maio 2014.

AZEVEDO, E.; CONCI, A. **Computação Gráfica: Teoria e prática**. São Paulo: Elsevier, 2003.

BALLARD, D. H. **An Introduction to Natural Computation**. Cambridge: MIT Press, 1999.

BAN, S. In: Shigeru Ban Architects. 2014. Disponível em: <<http://www.shigerubanarchitects.com/>>. Acesso em: 12 maio 2014.

BARBOSA, W.; ARAUJO, A.; CARVALHO, G.; CELANI, G. Samba Reception Desk: compromising aesthetics, fabrication and structural performance in the design process. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE, 30., 2012, Praga. **Anais...** Praga: Czech Technical University, 2012. p. 245-254.

BENEVOLO, L. **The Architecture of the Renaissance**. Londres: Routledge, 2002.

BENTLEY INC. In: Bentley. 2014. Disponível em: <<http://www.bentley.com/>>. Acesso em: 20 maio 2014.

BERSINI, H.; DETOUR, V. Asynchrony induces stability in cellular automata based models. In: BROOKS, R.; MAES, P. (Ed.). **Artificial Life IV**. Cambridge: MIT Press, 1994. p. 382-387.

BEYER, W. A.; SELLERS, P. H.; WATERMAN, M. S. Stanislaw M. Ulam's contributions to theoretical theory. **Letters in Mathematical Physics**, n. 10, p. 231-242, abr. 1985.

BLITZ, D. **Emergent Evolution: qualitative novelty**. Nova Iorque: Springer-Verlag, 2010.

BURKS, A. (Ed.). **Essays on Cellular Automata**. Chicago: University of Illinois Press, 1971.

BURRY, J.; BURRY, M. **The New Mathematics of Architecture**. Melbourne: Thames & Hudson, 2012.

CAGAN, J. Shape annealing solution to the constrained geometric knapsack problem. **Computer-Aided Design**, v. 26, n. 10, p. 1-20, out. 1994.

CAGAN, J.; MITCHELL, W. J. Optimally shape generation by shape annealing. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 20, n. 1, p. 5-12, fev. 1993.

CAILLAUD, B. Cellular automata and algorithmic visual creation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENERATIVE ART, 4., 2001, Milão. **Anais...** Milão: Politecnico di Milano, 2001. p. 1-15.

CAMAZINE, S.; DENEUBOURG, J.; FRANKS, N.; SNEYD, J.; THERAULAZ, G.; BONABEAU, E. **Self-Organization in Biological Systems**. Nova Jersey: Princeton University Press, 2001.

CELANI, G. Beyond analysis and representation in CAD: a new computational approach to design education. 2002. 202 f. Tese (Doutorado em Philosophy in Architecture Design and Computation)– Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2002.

CHEN, W.; LUI, E. M. **Handbook of Structural Engineering**. 2. ed. Seattle: Kindle Edition, 2005.

CHIKOFFSKY, E. J.; CROSS II, J. H. **Reverse engineering and design recovery: a taxonomy**. IEEE Software, v. 7, n. 1, p. 13-17, jan.1990.

CHILTON, J. **Space Grid Structures**. Oxford: Architectural Press, 2000.

COATES, P.; HEALY, N.; LAMB, C.; VOON, W. L.; The use of cellular automata to explore bottom up architectonic rules. In: EUROGRAPHICS UK ANNUAL CONFERENCE, 14., 1996, Londres. **Anais...** Londres: Imperial College London, 1996. p. 1- 14.

CORNING, P. A. **The Emergence of "Emergence": now what?** Emergence: Complexity & Organization, v. 4, n. 3, p. 54-71, dez. 2002.

COSSONS, N.; TRINDER, B. **The Iron Bridge: Symbol of the Industrial Revolution**. Hampshire: Phillimore, 2002.

DEAMER, P.; BERNSTEIN, P. (Ed.). **Building (in) the Future: recasting labor in architecture**. Nova Iork: Princeton Architectural Press, 2010.

DE CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. J. (Ed.). **Recent Developments in Biologically Inspired Computing**. Hershey: Idea Group, 2005.

DE JONG, U. Federation Square Melbourne: a 21st century architectural urban project? vision and reality. In: CENTURY CITY: PAST/PRESENT/FUTURE SEVENTH AUSTRALASIAN URBAN HISTORY/PLANNING HISTORY CONFERENCE, 21., 2004, Melbourne. **Anais...** Melbourne: Deakin University, 2004. p. 127-132.

DELATTRE, P. **Système, Structure, Evolution, Fonction, Evolution: essai d'analyse épistémologique**. Paris: Maloine Doin, 1971.

DIMITROVA, G.; KIRIL, M. In: Morphocode. 2014. Disponível em: <<http://morphocode.com/>>. Acesso em: 10 janeiro 2014.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **Bim Handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors**. 2. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2011.

EASTMAN, C. **Spatial Systems in Computer-Aided Building Design**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1975.

EIGENSATZ, M.; KILIAN, M.; SCHIFTNER, A.; MITRA, N. J.; POTTMANN, H.; PAULY, M. Paneling architectural freeform surfaces. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES, 37., 2010, Los Angeles. **Anais...** Los Angeles: Convention Center, 2010. p. 1-10.

EISENMAN, P. Visions unfolding: architecture in the age of electronic media. In: NESBITT, K. **Theorizing a New Agenda for Architecture**. 2. ed. Nova Jersey: Princeton Architectural Press, 1996. p. 556-561.

ENGEL, H. **Sistemas de Estruturas**. Barcelona: Gustavo Gili, 2006.

ERMENTROUT, G. B.; EDELSTEIN-KESHET, L. Cellular automata approaches to biological modeling. **Journal of Theoretical Biology**, v. 160, n. 1, p. 97- 133, jan. 1993.

FASOULAKI, E. Integrated design: a generative multi-performative design approach. 2008. 72 f. Dissertação (Mestrado em Architecture Studies)— Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2008.

FEST, E.; SHEA, K.; DOMER, B.; SMITH, I. F. C. Adjustable tensegrity structures. **Journal of Structural Engineering**, v. 129, n. 4, p. 515-526, abr. 2003.

FISCHER, T. Generation of Apparently Irregular Truss Structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN FUTURES, 11., 2005, Viena. **Anais...** Viena: Vienna University of Technology, 2005. p. 229-238.

FISCHER, T. Rationalising bubble trusses for batch production. **Automation in Construction**, v. 16, n. 1, p. 45-53, jan. 2007.

FISCHER, T.; BURRY, M.; FRAZER, J. Triangulation of generative form for parametric design and rapid prototyping. **Automation in Construction**, v. 14, n. 2, p. 233-240, mar. 2005.

FISCHER, T.; FISCHER, T.; CECCATO, C. Distributed agents for morphologic and behavioral expression in cellular design systems. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE, 21., 2002, Pomona. **Anais...** Pomona: Cal Poly, 2002. p.111-121.

FISCHER, T.; HERR, C. M. Teaching Generative Design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENERATIVE ART, 4., 2001, Milão. **Anais...** Milão: Politecnico di Milano, 2001. p. 1-14.

FLAKE, G. W. **The Computational Beauty of Nature**. Cambridge: MIT Press, 2000.

FLOYD, T. **Sistemas Digitais: fundamentos e aplicações**. Porto Alegre: Bookman, 2007.

FULLER, R. B. **Synergetics: explorations in the geometry of thinking**. Londres: Macmillan, 1982.

FUND, A. I. Form-finding structures. 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado em Civil and Environmental Engineering)— Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2008.

GARDNER, M. Extraordinary nonperiodic tiling that enriches the theory of tiles. **Scientific American**, v. 236, n. 1, p. 116-119, jan. 1977.

GARDNER, M. The remarkable lore of the prime number. **Scientific American**, v. 210, n. 3, p. 120-128, mar. 1964.

GARDNER, M. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". **Scientific American**, v. 223, n. 4, p. 120-123, out. 1970.

GEHRY TECHNOLOGIES. In: Gehry Technologies. 2014. Disponível em: <<http://www.gehrytechnologies.com/>>. Acesso em: 2 janeiro 2014.

GERO, J. Closing discussion. In: GERO, J. **Advances in Formal Design Methods for CAD**. Londres: Chapman & Hall, 1996. p. 291-298.

GORDON, D. **Ants at Work**: how an insect society is organized. Nova Iorque: The Free Press, 1999.

GORDON, D. In: Ted Talks: ideas worth spreading. The Emergent Genius of Ant Colonies. 2003. Disponível em: <<http://www.ted.com/>>. Acesso em: 12 setembro 2013.

GRAMß, T.; BORNHOLDT, S.; GROß, M.; MITCHELL, M.; PELLIZZARI, T. **Non-standard Computation**: molecular computation, cellular automata, evolutionary algorithms, quantum computers. Weinheim: Wiley-VCH, 2001.

GRAND, S. **Creation**: life and how to make it. Cambridge: Harvard University Press, 2001.

GROSS, J. L.; YELLEN, J. **Graph Theory and its applications**. 2. ed. Boca Raton: Chapman & Hall CRC, 2006.

HAMMER, M. **Beyond Reengineering**: how the process-centered organization is changing our work and our lives. Nova Iorque: Harper Business, 1997.

HERR, C. M.; FISCHER, T. Using hardware cellular automata to simulate use in adaptive architecture. In: CONFERENCE ON COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA, 9., 2004, Seul. **Anais...** Seul: Yonsei University, 2004. p. 815-828.

HERR, C. M.; KVAN, T. Adapting cellular automata to support the architectural design process. **Automation in Construction**, v. 16, n. 1, p. 61-69, jan. 2007.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**: an introductory analysis with application to biology, control and artificial intelligence. Cambridge: MIT Press, 1992.

HOLLAND, J. H. **Emergence**: from chaos to order. Nova Iorque: Basic Books, 1999.

HOLLAND, J. H. **Hidden Order**: how adaptation builds complexity. Nova Iorque: Basic Books, 1995.

HOLLAND, J. H. Studying complex adaptive systems. **Journal of Systems Science & Complexity**, v. 19, n. 1, p. 1-8, mar. 2006.

HOLLAND, J. H. The dynamics of searches directed by genetic algorithms. In: LEE, Y. C. **Evolution Learning and Cognition**. Singapura: World Scientific, 1988. p. 111-128.

HOLLAND, J. H. Universal spaces: a basis for studies in adaptation. In: CAIANIELLO, E. R. **Automata Theory**. Nova Iorque: Academic Press, 1966. p. 218- 230.

HÖLLDOBLER, B.; WILSON, E. O. **The Journey of the Ants**. Cambridge: Bellknap Press/Harvard University Press, 1994.

HOLMAN, P. **Engaging Emergence**: turning upheaval into opportunity. São Francisco: Berrett-Koehler, 2010.

HOPCROFT, J. E.; MOTWANI, R.; ULLMAN, J. D. **Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation**. 2. ed. Nova Iorque: Addison Wesley, 2001.

HOUAISS, A. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2009.

HUFFMAN, D. A. A method for the construction of minimum-redundancy codes. In: PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE OF RADIO ENGINEERING, 40., 1952, Nova Iorque. **Anais...** Nova Iorque: Institute of Radio Engineering, 1952. p. 1098-1101.

HUDSON, R.; SHEPHERD, P.; HINES, D. Aviva Stadium: a case study in integrated parametric design. **International Journal of Architectural Computing**, v. 9, n. 2, p. 187-203, jun. 2011.

ILACHINSKI, A. **Cellular Automata**: a discrete universe. Nova Jersey: World Scientific, 2001.

JÁUREGUI, V. G. Controversial origins of tensegrity. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES SYMPOSIUM, 2009, Valencia. **Anais...** Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2009. p. 1642-1652.

JOHNSON, S. **Emergência**: a dinâmica de rede em formigas, cérebros e cidades. Rio de Janeiro: Zahar, 2003.

KILIAN, A. Design explorations through bidirectional modeling of constraints. 2006. 325 f. Tese (Doutorado em Philosophy in Architecture Design and Computation)– Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2006.

KILIAN, A. The sheering form. **Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures**, v. 48, n. 4, p. 17-21, jul. 2008.

KILIAN, A.; OCHSENDORF, J. Particle-spring systems for structural form-finding. **Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures**, v. 46, n. 148, p. 77-84, ago. 2005.

KNUTH, D. **Seminumerical Algorithms**. Reading: Addison-Wesley, 1981.

KOLAREVIC, B. Blobs amidst boxes: aesthetics and ethics in contemporary free-form building design. **Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures**, v. 48, n. 156, p. 11-16, nov. 2007.

KOLAREVIC, B. Information master builders. In: KOLAREVIC, B. (Ed.). **Architecture in the Digital Age: design and manufacturing**. Londres: Routledge, 2003.

KOLAREVIC, B.; MALKAWI, A. M. (Ed.). **Performative Architecture Beyond Instrumentality**. Nova Iorque: Spon Press, 2005.

- KRAWCZYK, R. J. Architectural Interpretation of Cellular Automata. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENERATIVE ART, 4., 2001, Milão. **Anais...** Milão: Politecnico di Milano, 2001. p. 71-78.
- KUHN, T. S. **The Structure of the Science Revolution**. 2. ed. Chicago: The University of Chicago, 1962.
- KUROKAWA, K. **Kisho Kurokawa: museums**. Mônaco: l'Arca Edizioni, 2002.
- LAN, T. T. Space Frame Structures. In: CHEN, W.; LUI, E. M. **Handbook of Structural Engineering**. Seattle: Kindle Edition, 2005.
- LANGTON, C. G. Computation at the edge of chaos: phase transitions and emergent computation. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 42, n. 1-3, p. 12-37, jun.1990.
- LANGTON, C. G. Studying artificial life with cellular automata. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 22, n. 1-3, p. 20-149, nov. 1986.
- LAROUSSE, P. **Dictionnaire Larousse de Poche** 2014. Paris: French and European Publications, 2014.
- LEWES, G. H. **Problems of Life and Mind**. Londres: Trübner & Co/Ludgate Hill, 1874.
- LEWIN, R. **Complexity: life at the edge of chaos**. 2. ed. Chicago: University of Chicago Press, 2000.
- LI, J. Cellular Automata. In: HYÖTYNIEMI, H. **Complex Systems: science on the edge of chaos**. Helsink: Helsinki University of Technology, 2004. p. 73-87.
- LIN, Z. **Kenzo Tange and the Metabolist Movement: urban utopias of modern Japan**. Londres: Routledge, 2010.
- LUMER, E.; FAIETA, B. Diversity and adaptation in populations of clustering ants. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SIMULATION OF ADAPTATIVE BEHAVIOR, 3., 1994, Cambridge. **Anais...** Cambridge: MIT Press, 1994. p. 499-508.
- MAKOWSKI, Z. S. **Estructuras Espaciales de Acero**. Barcelona: Gustavo Gili, 1968.
- MANDELBROT, B. B. **The Fractal Geometry of Nature**. Nova Iorque: Henry Holt, 1982.
- MARCINIAK, J. J. (Ed.). **Encyclopedia of Software Engineering**. 2. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2001.
- MARGOLUS, N.; TOFFOLI, T. Cellular Automata Machines. **Complex Systems**, v. 1, n. 5, p. 967-993, set. 1987.
- MANAHL, M.; STAVRIC, M.; WILTSCHE, A. Ornamental discretisation of free-form surfaces. **International Journal of Architectural Computing**, v. 10, n. 4, p. 596-612, dez. 2012.
- MCNEEL, INC. In: Robert McNeel & Associates. 2014. Disponível em: <<http://www.mcneel.com/>>. Acesso em: 20 maio 2014.

MCQUAID, M. **Shigeru Ban**. Londres: Phaidon Press, 2003.

MERRIAM-WEBSTER. In: Online Etymology Dictionary. Complex definition. 2013. Disponível em: <<http://www.etymonline.com/>>. Acesso em: 2 maio 2013.

MIGNOT, C. **Architecture of the Nineteenth Century**. Colônia: Taschen GmbH, 1994.

MITCHELL, W. J. **A Lógica da Arquitetura**. Tradução Gabriela Celani. Campinas: Unicamp, 2008.

MITCHELL, W. J. **Computer-Aided Architectural Design**. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold, 1977.

MITCHELL, W. J. The theoretical foundation of computer-aided architectural design. **Environment and Planning B: Planning and Design**, Londres, v. 2, n. 2, p. 127-150, dez. 1975.

MOTRO, R. (Ed.). **An Anthology of Structural Morphology**. Singapura: World Scientific, 2009.

MOTRO, R. Nodes and Spatial Structures: A tribute to Stéphane Du Chateau. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELLS AND SPATIAL STRUCTURES SYMPOSIUM, 2013, Wrocław. **Anais...** Wrocław: Wrocław University of Technology, 2013. p. 1-5.

MOTRO, R. **Tensegrity: structural system for the future**. Londres: Kogan Page Science, 2003.

MUELLER, C, T. Computational explorations of the structural design space. 2014. 206 f. Tese (Doutorado em Philosophy in Architecture: Building Technology)– Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2014.

MUNGAN, I.; ABEL, J. F. (Ed.). **Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures**. Madri: IASS, 2009.

MUNKRES, J. R. **Topology**. 2. ed. Nova Jersey: Prentice Hall, 2000.

NARAYAN, K. L.; RAO, K. M.; SARCAR, M. M. **Computer-Aided Design and Manufacturing**. Nova Deli: Asoke K. Ghosh, 2008.

NARAYANAN, S. **Space Structures: principles and practice**. Brentwood: Multi-Science Publishing, 2006.

NEGROPONTE, N. **A Vida Digital**. Tradução Sérgio Tellaroli e Ricardo Rangel. 2. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

NERDINGER, W. (Ed.). **Frei Otto Complete Works: lightweight construction natural design**. Berlim: Birkhäuser Architecture, 2005.

NEWELL, A.; SHAW, J.; SIMON, H. Chess-playing programs and the problem of complexity. In: **IBM Journal of Research and Development**, v. 2. n. 4, p. 320-335, mar. 1958.

NOOSHIN, H.; HADKER, D. Exploring configuration process. In: PARKE, G. A.; HOWARD, C. M. **Space Structures 4**. Mitcham: Thomas Telford Services, 1993. p. 1033-1043.

O'DONNELL, J. In: Fields of Activity: experiments and off-project ideas at Arup. Smart Nodes Research. 2014. Disponível em: <<http://www.fieldsofactivity.com/>>. Acesso em: 7 maio 2014.

OTTO, F.; RASCH, B. **Finding Form: towards an architecture of the minimal**. Stuttgart: Axel Menges, 1996.

OXMAN, R.; OXMAN, R. The new structuralism: design, engineering and architectural technologies. **Architectural Design**, v. 80, n. 4, p. 15-23, Londres, ago. 2010.

PATON, R.; BOLOURI, H.; HOLCOMBE, M. **Computing in Cells and Tissues: perspectives and tools of thought**. Berlin: Springer-Verlag, 2003.

PEPPER, S. C. Emergence (1926). **Journal of Philosophy**, v. 23, n. 9, p. 241-245, republicação jan. 2005.

PETERS, H. **Game Theory: a multi-leveled approach**. Heidelberg: Springer, 2008.

POHL, E. B. **Watercube: the book**. Barcelona: Actar- D, 2008.

POST, E. L. Finite Combinatory Processes-Formulation 1. **The Journal of Symbolic Logic**, v. 1, n. 3, p. 103- 105, set. 1936.

POST, E. L. Recursive Unsolvability of a Problem of Thue. **The Journal of Symbolic Logic**, v. 12, n. 1, p. 1-11, mar. 1947.

POTTMANN, H. Architectural geometry and fabrication-aware design. **Nexus: Relationships Between Architecture and Mathematics**, v. 15, n. 2, p. 195-208, abr. 2013.

PRESSMAN, R. **Software Engineering: a practitioner's approach**. 7. ed. Nova Iorque: McGraw- Hill, 2009.

RADIN, C. Space tilings and local isomorphism. **Geometriae Dedicata**, v. 42, n. 3, p. 355-360, jun. 1992.

RAMASWAMY, G. S.; EEKHOUT, O. M.; SURESH, G. R. **Analysis, Design and Construction of Steel Space Frames**. Londres: Thomas Telford, 2002.

REBELLO, Y. C. P. **A Concepção Estrutural e a Arquiteura**. 5. ed. São Paulo: Zigurate, 2007.

RESNICK, M. **Turtles, Termites and Traffic Jams: explorations in massively parallel microworlds**. Cambridge: MIT Press, 1994.

RICHARDSON, J. N.; ADRIAENSSENS, S.; COELHO, R. F.; BOUILLARD, P. Coupled form-finding and grid optimization approach for single layer grid shells. **Engineering Structures**, v. 52, n. 7, p. 230- 239, jul. 2013.

ROTHEROE, K. **The Computer-Aided Design and Manufacture of Complexly-Shaped Metal Architectural Frame Structures**. Ann Arbor: UMI Dissertation Services, 2000.

ROWE, P. G. **Design Thinking**. Cambridge: MIT Press, 1987.

SASS, L. In: MIT OpenCourseWare. Introduction to Design Computing. 2014. Disponível em: <<http://ocw.mit.edu/courses/architecture/>>. Acesso em: 20 maio 2014.

SAYED, M. E.; ARANCHI, D.; BART, P.; JIANG, Y.; SANTOS, F. In: Sucher punch. Cellular Automata: Evaluating the Edge of Chaos. 2014. Disponível em: <<http://www.suckerpunchdaily.com/>>. Acesso em: 22 janeiro 2014.

SCHIFF, J. L. **Cellular Automata: a discrete view of the world**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

SCHODEK, D. **Digital Design and Manufacturing Applications in Architecture and Design**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2004.

SCHRANDT, R.; ULAM, S. On Recursively Defined Geometrical Objects and Patterns of Growth. In: BURKS, A. **Essays on Cellular Automata**. Urbana: University of Illinois Press, 1970. p. 232-243.

SCHULMAN, L. S.; SEIDEN, P. E. Percolation and galaxies. **Science**, v. 233, n. 25, p. 425-431, jul. 1986.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **The Bell System Technical Journal**, v. 27, n. 3, p. 379-423, jul. 1948.

SHANNON, C. E. A symbolic analysis of relay and switching circuits. **Transactions American Institute of Electrical Engineers**, v. 57, n. 12, p. 713-723, maio 1938.

SHANNON, C. E.; WEAVER, W. **A Teoria Matemática da Comunicação**. Tradução Orlando Agueda. São Paulo: Difel, 1975.

SHEA, K.; AISH, R.; GOURTOVAIA, M. Towards integrated performance-driven generative design tools. **Automation in Construction**, v. 15, n. 2, p. 253-264, mar. 2005.

SHEA, K.; CAGAN, J. The design of novel roof trusses with shape annealing: assessing the ability of a computation method in aiding structural designers with varying design intent. **Design Studies**, v. 20, n. 1, p. 3-23, jan. 1999.

SHEA, K.; FEST, E.; SMITH, I. F. Developing intelligent tensegrity structures with stochastic search. **Advanced Engineering Informatics**, v. 16, n. 1, p. 21-40, jan. 2002.

SHELDEN, D. R. Digital Surface Representation and the Constructability of Gehry's Architecture. 2002. 340 f. Tese (Doutorado em Philosophy in Architecture Design and Computation)– Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2002.

SHEPHERD, P.; HUDSON, R.; HINES, D. Aviva Stadium: a parametric success. **International Journal of Architectural Computing**, v. 9, n. 2, p. 167-185, jun. 2011.

- SHERAFAT, V.; DE CASTRO, L. N.; HRUSCHKA, E. R. The influence of pheromone and adaptative vision in the standard ant clustering algorithm. In: DE CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. J. **Recent Developments in Biologically Inspired Computing**. Hershey: Idea Group, 2005. p. 207-234.
- SHIFFMAN, D. In: The Nature of the Code. 2012. Disponível em: <<http://www.natureofcode.com/>>. Acesso em: 27 novembro 2013.
- SIERPIŃSKI, W. **250 Problems in Elementary Number Theory**. Nova Iorque: American Elsevier Publishing Company, 1970.
- SILVA, N. F.; BRIDGES, A. H.; LIMA, E. M.; MORAIS, H. R. A.; JUNIOR, F. A. S. A indústria da construção civil está pronta para a fabricação digital e a customização em massa? Uma pesquisa sobre um caso Brasileiro. CONGRESO DE SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 13., 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Mackenzie, 2009.
- SILVER, P.; MCLEAN, W. **Introduction to Architectural Technology**. Londres: Laurence King, 2008.
- SILVER, S. A. In: The Lexicon Life. The Glider Gun. 2009. Disponível em: <<http://www.argentum.freeserve.co.uk/>>. Acesso em: 12 dezembro 2013.
- SKETCHES of Frank Gehry. Direção: Sydney Pollack. Produção: Ultan Guilfoyle. California: SONY Pictures, 2006. (83 min).
- SPENCER, H. **The Principles of Ethics**. Indianapolis: Libert Found, 1978.
- TATA STEEL. In: Tata Steel Construction, 2014. Disponível em: <<http://www.tatasteelconstruction.com/>>. Acesso em: 12 janeiro 2014.
- TEMPESTI, G. A Self-Repairing Multiplexer-Based FPGA Inspired by Biological Process. 1998. 154 f. Tese (Doutorado em Computer Science)– École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 1998.
- TERZIDIS, K. **Algorithmic Architecture**. Oxford: Architectural Press, 2006.
- TESTA, P.; O'REILLY, U.; KANGAS, M.; KILIAN, A. MoSS - morphogenetic surface structure: a software tool for design exploration. In: GREENWICH CREATIVE DESIGN SYMPOSIUM, 2000, Wrocław. **Anais...** Londres: University of Greenwich, 2000. p. 1-11.
- THE OEIS FOUNDATION INC. In: The On-Line Encyclopedias of Integer Sequences, 2010. Disponível em: <<http://www.oeis.org/>>. Acesso em: 2 out. 2013.
- TOFFOLI, T.; MARGOLUS, N. **Cellular Automata Machines: a new environment for modeling**. Cambridge: MIT Press, 1987.
- TRIODETIC. In: Triodetic Space Frames. 2014. Disponível em: <<http://www.triodetic.com/>>. Acesso em: 12 janeiro 2014.
- TURING, A. M. Computing Machinery and Intelligence. **Mind: A Quaterly Review of Psychology and Philosophy**, v. 59, n. 236, p. 433-460, out. 1950.

- TURING, A. M. On computable numbers, with an application to the entscheidungs problem. **Proceedings of the London Mathematical Society**, v. 2, n. 40, p. 230-265, nov. 1937.
- ULAM, S. **A Collection of Mathematical Problems**. Nova York: Interscience, 1960.
- VENTURI, R. **Complexidade e Contradição em Arquitetura**. 2. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2004.
- VAN MELE, T.; LACHAUER, L.; RIPPMMANN, M.; BLOCK, P. Geometry-based understanding of structures. **Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures**, v. 53, n. 4, p. 285- 295, out. 2012.
- VON BERTALANFFY, L. **General System Theory: Foundations, Development, Applications**. Nova Iorque: George Braziller, 1968.
- VON NEUMANN, J. General and Logical Theory of Automata. In: TAUB, A. H. **John von Neumann: Collected works**. Oxford: Pergamon Press, 1963.
- VON NEUMANN, J. **The Computer and the Brain**. 2. ed. New Haven: Yale University Press, 1958.
- VON NEUMANN, J.; BURKS, A. W. **Theory of Self-Reproducing Automata**. Urbana: University of Illinois Press, 1966.
- WACHSMANN, K. **The Turning Point of Building**. Nova Iorque: Reinholds, 1961.
- WAKEFIELD, D. Tensile structures design an engineer's perspective. **Architectural Design**, v. 76, n. 4, p. 92-95.
- WALDROP, M. **Complexity: the emerging science at the edge of order and chaos**. Nova Iorque: Touchstone Books, 1992.
- WEAIRE, D.; HUTZLER, S. **The Physics of Foams**. Oxford: Clarendon Press, 1999.
- WEAIRE, D.; PHELAN, R. A counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces. **Philosophical Magazine Letters**, v. 69, n. 2, p. 107-110, fev. 1994.
- WEAVER, W. Science and complexity (1948). **Emergence: Complexity and Organization**, v. 6, n. 3, p. 65-74, republicação set. 2004.
- WEISSTEIN, E. W. In: Eric Weisstein's Home Page. Life Forms. 2009. Disponível em: <<http://www.ericweisstein.com/>>. Acesso em: 26 out. 2013.
- WEISSTEIN, E. W.; WOLFRAM, S. In: Wolfram Mathworld: the web's most extensive mathematics research. Moore Neighborhood. 1999. Disponível em: <<http://www.mathworld.com/>>. Acesso em: 22 out. 2013.
- WINSLOW, P.; PELLEGRINO, S.; SHARMA, S. B.; Multi-objective optimization of free-form grid structures. **Structural e Multidisciplinary Optimization**, v. 40, n. 1-6, p. 257-269, fev. 2009.
- WOLFRAM, S. **A New Kind of Science**. Champaign: Wolfram Media, 2002.

WOLFRAM, S. Computation Theory of Cellular Automata. **Communication in Mathematical Physics**, v. 96, n. 1, p. 15-57, mar. 1984.

WOLFRAM, S. Cryptography with cellular automata. In: ADVANCES IN CRYPTOLOGY, 1985, Santa Barbara. **Anais...** Santa Barbara: University of California, 1985. p. 429-432.

WOLFRAM, S. **Theory and Application of Cellular Automata**. Reading: Addison-Wesley, 1986.

WOLFRAM, S. In: Wolfram Mathworld: the webs most extensive mathematics research. 2014. Disponível em: <<http://www.mathworld.wolfram.com/>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

YIN, R. K. **Applications of Case Study Research**. Thousand Oaks: Sage, 2003.

ZUNG, T. K. **Buckminster Fuller**: anthology for the new millennium. Nova Iorque: St. Martin's Press, 2001.

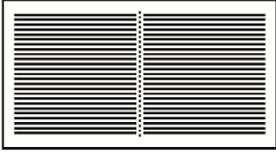
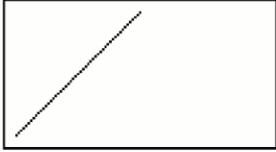
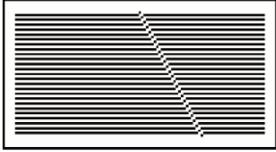
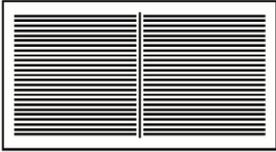
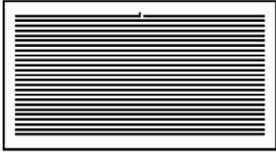
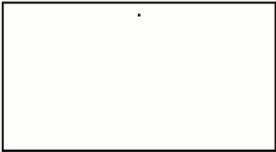
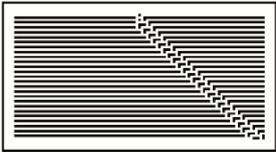
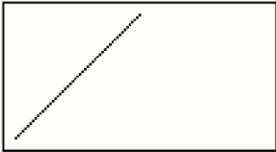
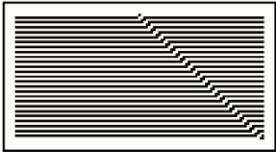
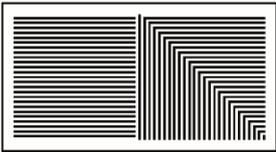
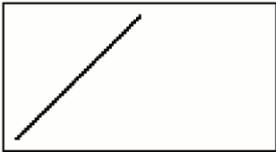
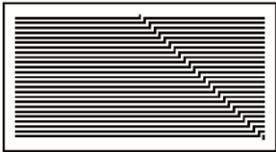
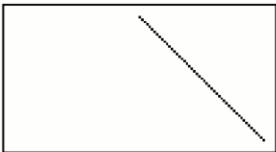
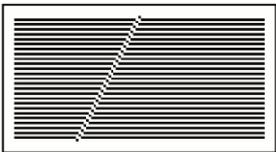
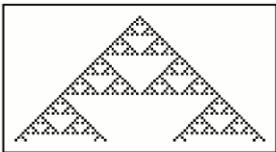
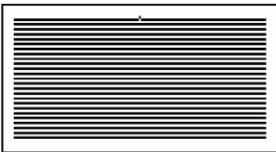
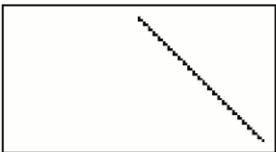
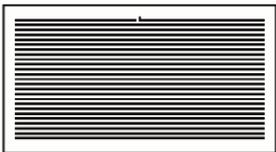
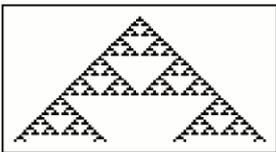
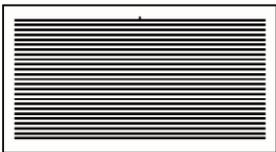
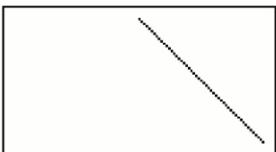
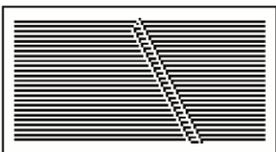
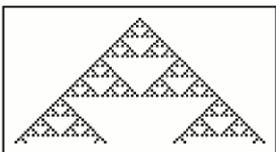
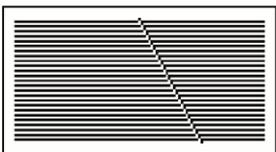
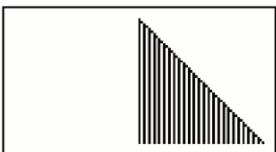
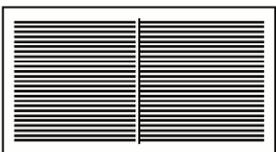
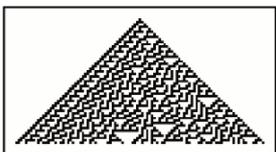
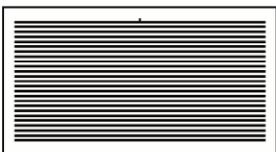
Anexo A

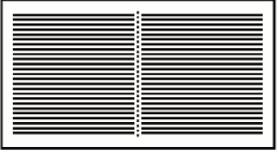
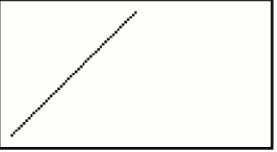
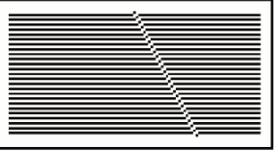
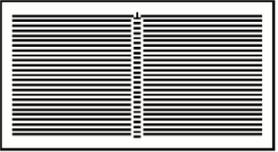
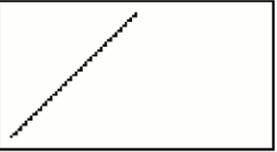
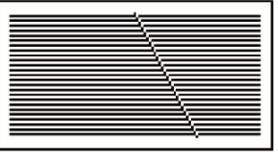
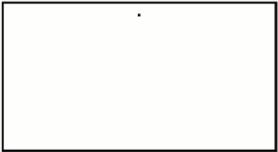
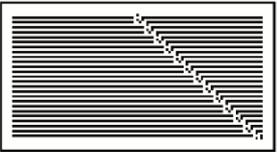
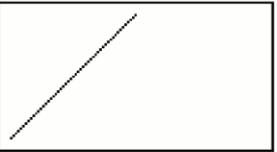
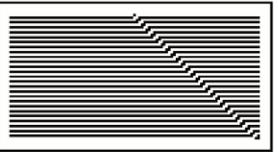
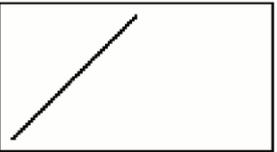
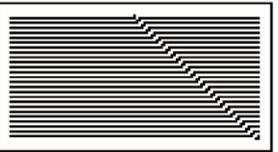
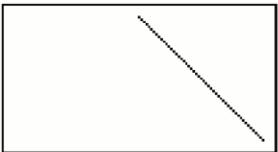
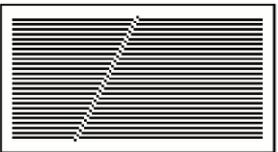
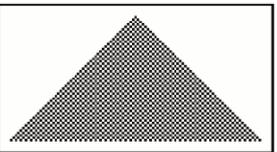
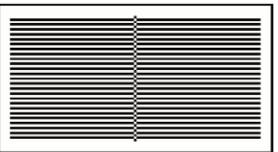
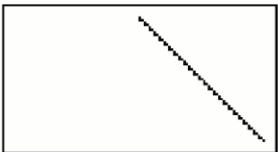
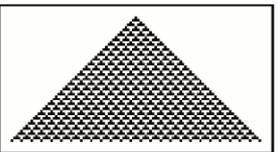
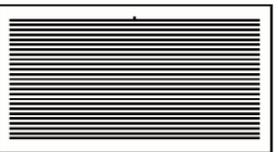
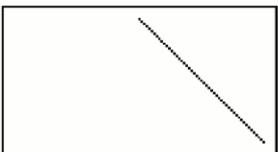
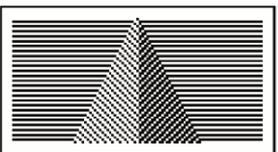
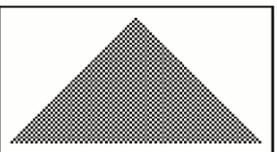
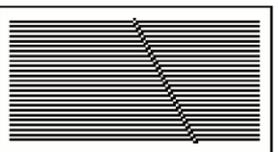
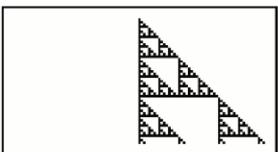
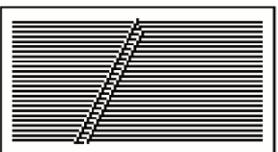
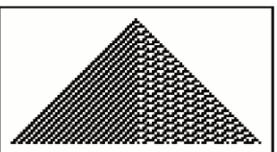
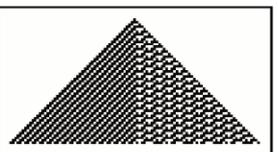
Autômatos

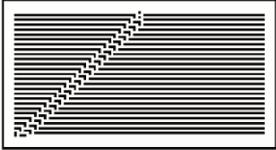
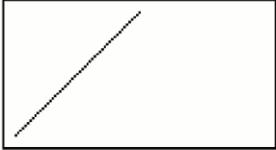
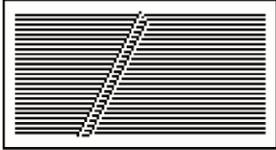
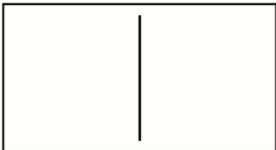
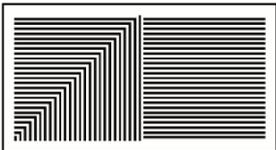
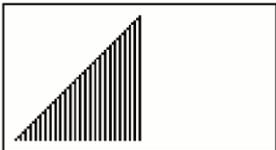
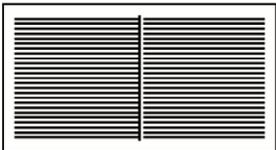
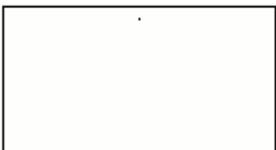
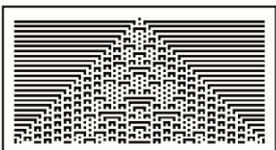
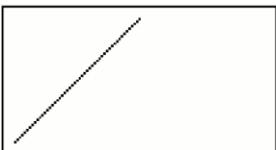
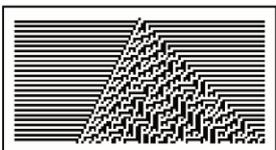
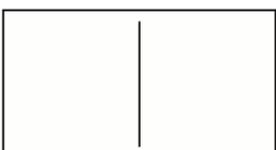
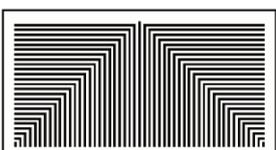
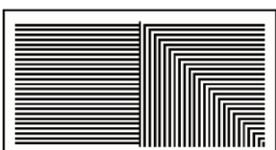
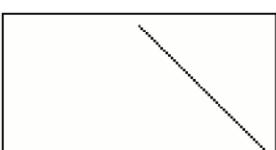
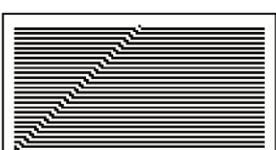
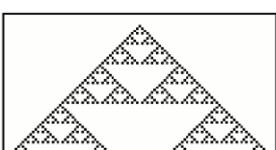
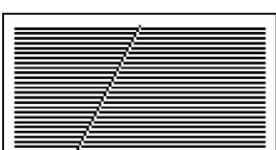
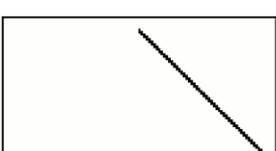
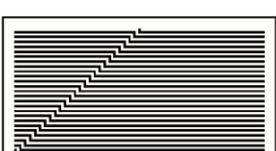
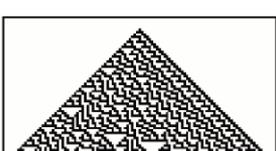
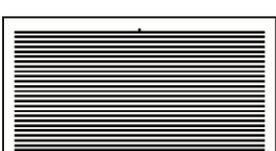
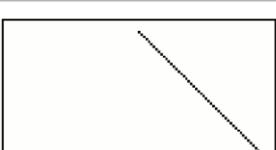
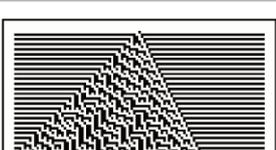
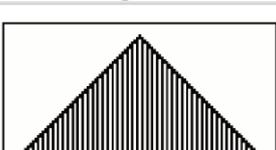
Celulares

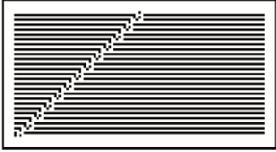
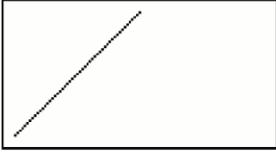
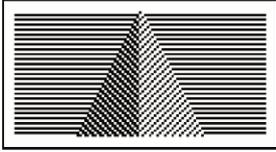
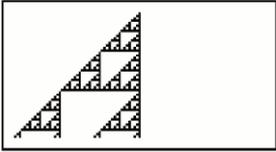
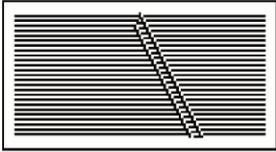
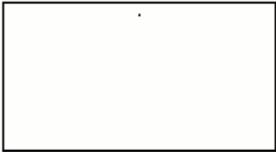
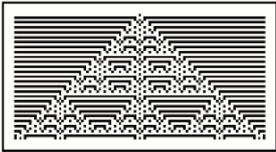
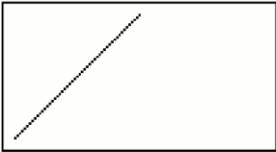
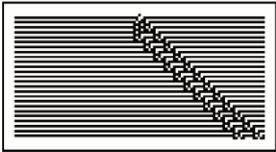
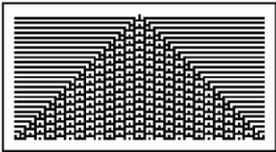
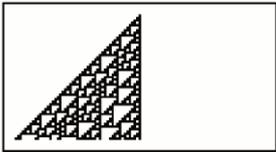
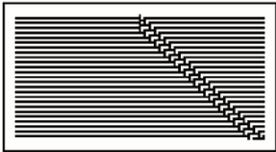
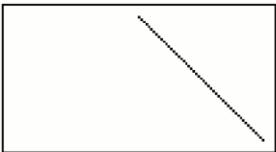
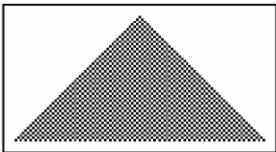
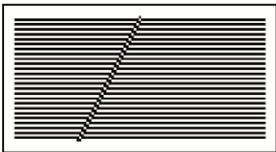
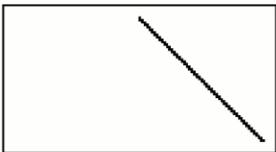
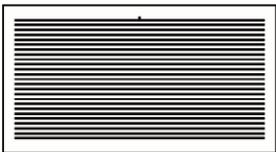
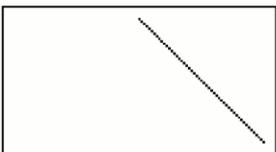
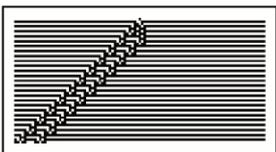
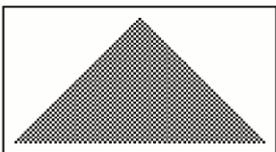
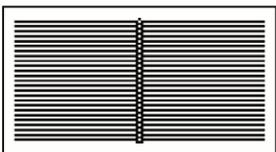
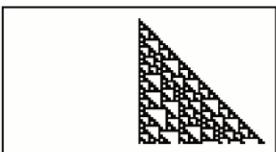
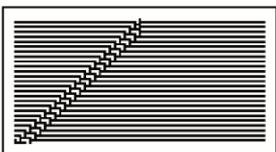
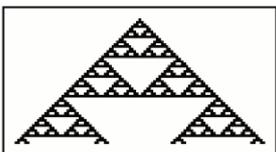
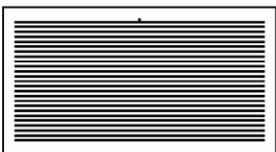
Elementares

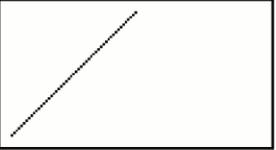
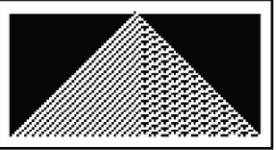
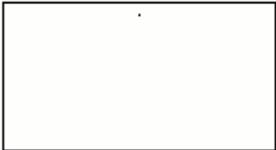
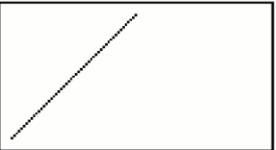
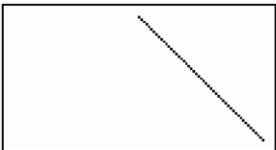
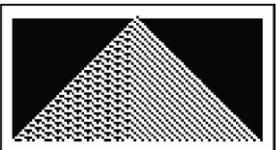
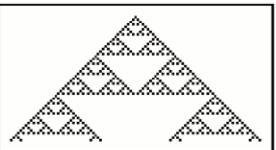
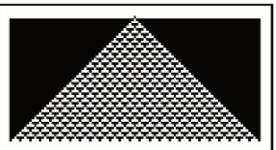
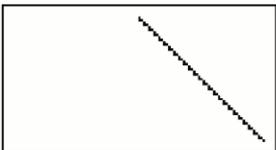
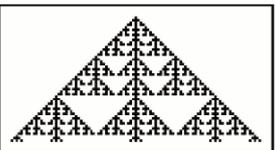
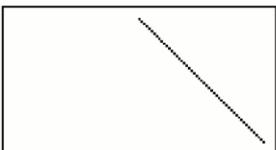
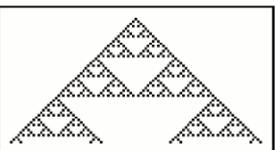
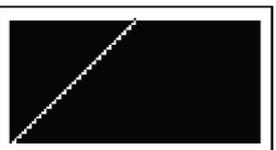
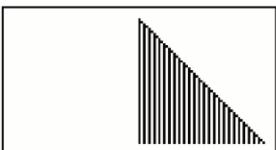
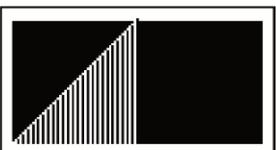
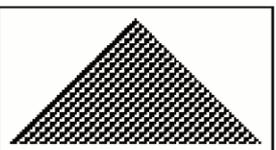
Retirado de: WOLFRAM, S. **A New Kind of Science**. Champaign: Wolfram Media, 2002. p. 55-56.

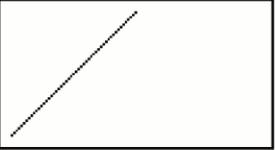
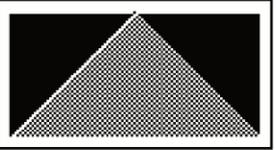
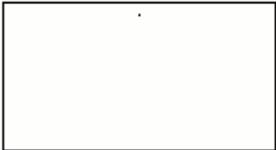
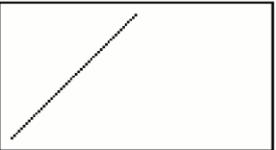
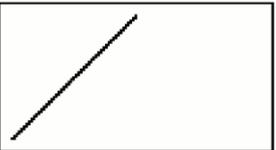
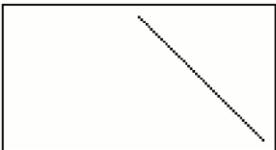
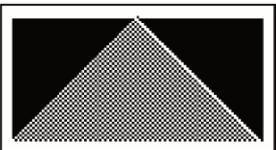
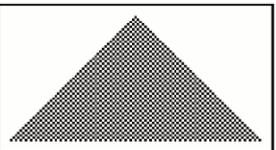
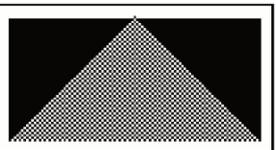
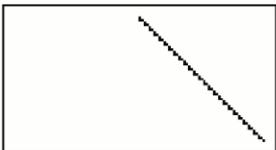
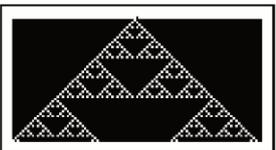
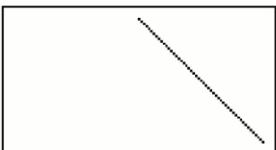
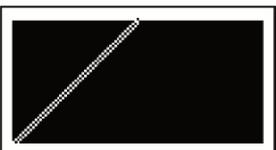
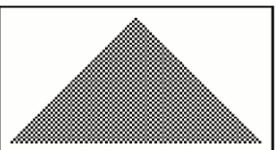
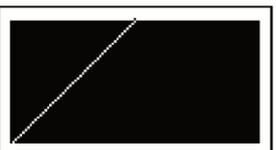
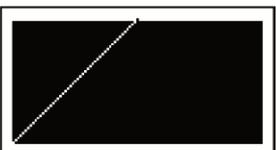
			
Regra 0	Regra 1	Regra 2	Regra 3
			
Regra 4	Regra 5	Regra 6	Regra 7
			
Regra 8	Regra 9	Regra 10	Regra 11
			
Regra 12	Regra 13	Regra 14	Regra 15
			
Regra 16	Regra 17	Regra 18	Regra 19
			
Regra 20	Regra 21	Regra 22	Regra 23
			
Regra 24	Regra 25	Regra 26	Regra 27
			
Regra 28	Regra 29	Regra 30	Regra 31

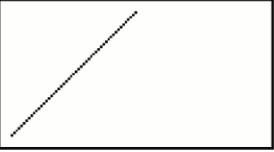
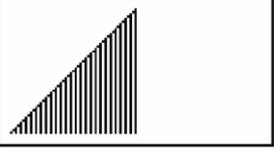
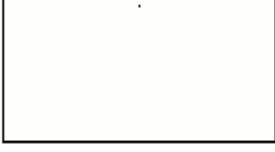
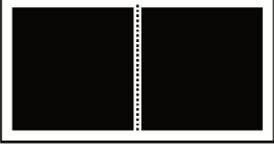
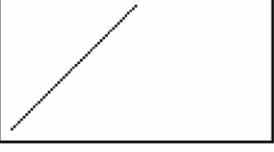
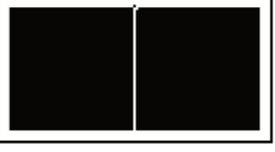
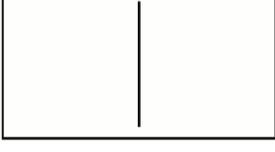
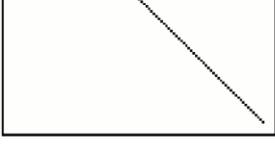
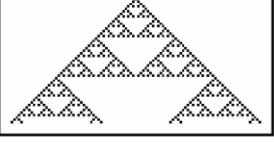
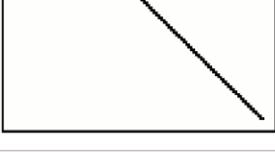
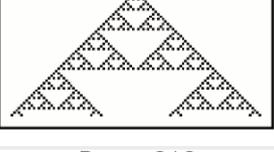
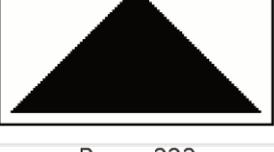
			
Regra 32	Regra 33	Regra 34	Regra 35
			
Regra 36	Regra 37	Regra 38	Regra 39
			
Regra 40	Regra 41	Regra 42	Regra 43
			
Regra 44	Regra 45	Regra 46	Regra 47
			
Regra 48	Regra 49	Regra 50	Regra 51
			
Regra 52	Regra 53	Regra 54	Regra 55
			
Regra 56	Regra 57	Regra 58	Regra 59
			
Regra 60	Regra 61	Regra 62	Regra 63

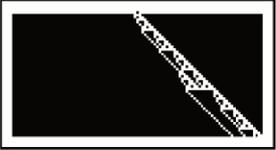
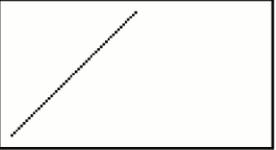
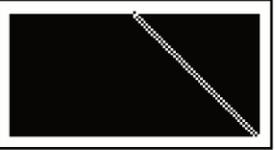
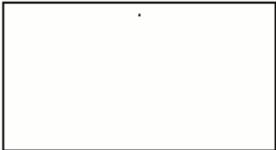
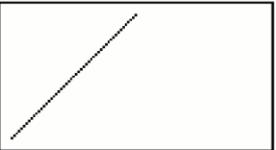
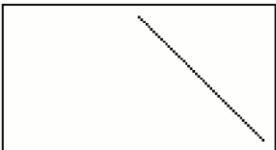
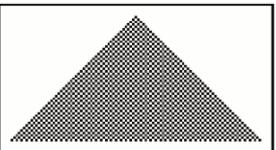
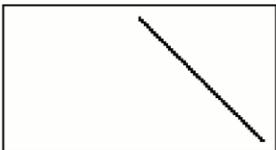
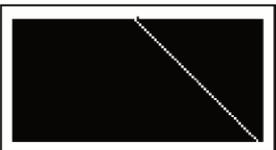
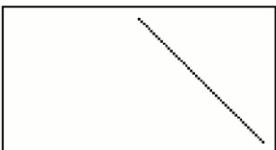
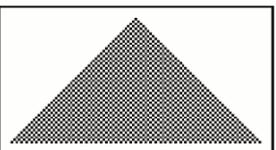
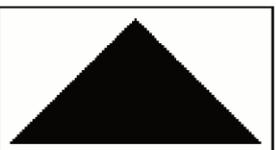
			
Regra 64	Regra 65	Regra 66	Regra 67
			
Regra 68	Regra 69	Regra 70	Regra 71
			
Regra 72	Regra 73	Regra 74	Regra 75
			
Regra 76	Regra 77	Regra 78	Regra 79
			
Regra 80	Regra 81	Regra 82	Regra 83
			
Regra 84	Regra 85	Regra 86	Regra 87
			
Regra 88	Regra 89	Regra 90	Regra 91
			
Regra 92	Regra 93	Regra 94	Regra 95

			
Regra 96	Regra 97	Regra 98	Regra 99
			
Regra 100	Regra 101	Regra 102	Regra 103
			
Regra 104	Regra 105	Regra 106	Regra 107
			
Regra 108	Regra 109	Regra 110	Regra 111
			
Regra 112	Regra 113	Regra 114	Regra 115
			
Regra 116	Regra 117	Regra 118	Regra 119
			
Regra 120	Regra 121	Regra 122	Regra 123
			
Regra 124	Regra 125	Regra 126	Regra 127

			
Regra 128	Regra 129	Regra 130	Regra 131
			
Regra 132	Regra 133	Regra 134	Regra 135
			
Regra 136	Regra 137	Regra 138	Regra 139
			
Regra 140	Regra 141	Regra 142	Regra 143
			
Regra 144	Regra 145	Regra 146	Regra 147
			
Regra 148	Regra 149	Regra 150	Regra 151
			
Regra 152	Regra 153	Regra 154	Regra 155
			
Regra 156	Regra 157	Regra 158	Regra 159

			
Regra 160	Regra 161	Regra 162	Regra 163
			
Regra 164	Regra 165	Regra 166	Regra 167
			
Regra 168	Regra 169	Regra 170	Regra 171
			
Regra 172	Regra 173	Regra 174	Regra 175
			
Regra 176	Regra 177	Regra 178	Regra 179
			
Regra 180	Regra 181	Regra 182	Regra 183
			
Regra 184	Regra 185	Regra 186	Regra 187
			
Regra 188	Regra 189	Regra 190	Regra 191

			
Regra 192	Regra 193	Regra 194	Regra 195
			
Regra 196	Regra 197	Regra 198	Regra 199
			
Regra 200	Regra 201	Regra 202	Regra 203
			
Regra 204	Regra 205	Regra 206	Regra 207
			
Regra 208	Regra 209	Regra 210	Regra 211
			
Regra 212	Regra 213	Regra 214	Regra 215
			
Regra 216	Regra 217	Regra 218	Regra 219
			
Regra 220	Regra 221	Regra 222	Regra 223

			
Regra 224	Regra 225	Regra 226	Regra 227
			
Regra 228	Regra 229	Regra 230	Regra 231
			
Regra 232	Regra 233	Regra 234	Regra 235
			
Regra 236	Regra 237	Regra 238	Regra 239
			
Regra 240	Regra 241	Regra 242	Regra 243
			
Regra 244	Regra 245	Regra 246	Regra 247
			
Regra 248	Regra 249	Regra 250	Regra 251
			
Regra 252	Regra 253	Regra 254	Regra 255

Anexo B

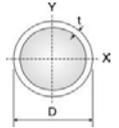
Propriedades geométricas dos perfis tubulares

Retirado de: Catálogos Vallourec & Mannesmann do Brasil



Tubos Estruturais - Seção Circular

Vallourec & Mannesmann do Brasil



Dimen. Externas	Espessura da Parede	Massa por Unidade de Comp.	Área da Seção Transv.	Momento de Inércia	Raio de Giração	Módulo Elástico Resist. à Flexão	Módulo Plástico Resistente à Flexão	Const. Torção	Módulo de Resist. Torção	Perím.
D (mm)	t (mm)	P (kg/m)	A (cm ²)	I (cm ⁴)	r (cm ³)	W (cm ³)	Z (cm ³)	J (cm ⁴)	W _t (cm ³)	U (m ² /m)
33,4	3,2	2,38	3,04	3,50	1,07	2,10	2,93	7,00	4,19	0,105
	3,6	2,65	3,37	3,80	1,06	2,27	3,21	7,59	4,55	
38,1	3,2	2,75	3,51	5,39	1,24	2,83	3,91	10,08	5,66	0,120
	3,6	3,06	3,90	5,87	1,23	3,08	4,30	11,70	6,16	
	4,0	3,36	4,29	6,31	1,21	3,31	4,67	12,60	6,63	
42,2	3,6	3,43	4,37	8,20	1,37	3,89	5,38	16,40	7,77	0,133
	4,0	3,77	4,80	8,85	1,36	4,20	5,86	17,70	8,39	
	4,5	4,18	5,33	9,60	1,34	4,55	6,43	19,20	9,10	
	5,0	4,59	5,84	10,30	1,33	4,88	6,96	20,60	9,75	
48,3	3,6	3,97	5,06	12,70	1,59	5,26	7,21	25,40	10,50	0,152
	4,0	4,37	5,57	13,80	1,57	5,70	7,87	27,50	11,40	
	4,5	4,86	6,19	15,00	1,56	6,21	8,66	30,00	12,40	
	5,0	5,34	6,80	16,20	1,54	6,69	9,42	32,30	13,40	
	5,6	5,90	7,51	17,40	1,52	7,21	10,30	34,80	14,40	
	6,3	6,53	8,31	18,70	1,50	7,76	11,20	37,50	15,50	
60,3	3,6	5,03	6,41	25,90	2,01	8,58	11,60	51,70	17,20	0,189
	4,0	5,55	7,07	28,20	2,00	9,34	12,70	56,30	18,70	
	4,5	6,19	7,89	30,90	1,98	10,20	14,00	61,80	20,50	
	5,0	6,82	8,69	33,50	1,96	11,10	15,30	67,00	22,20	
	5,6	7,55	9,62	36,40	1,94	12,10	16,80	72,70	24,10	
	6,3	8,39	10,70	39,50	1,92	13,10	18,85	79,00	26,20	
	7,1	9,32	11,90	42,70	1,90	14,20	20,20	85,50	28,30	
	8,0	10,30	13,10	46,00	1,87	15,30	22,10	92,00	30,50	
73,0	8,8	11,20	14,20	48,60	1,85	16,10	23,60	97,20	32,20	0,229
	3,6	6,16	7,85	47,40	2,46	13,00	17,40	94,80	26,00	
	4,0	6,81	8,67	51,80	2,44	14,20	19,10	104,00	28,40	
	4,5	7,60	9,68	57,00	2,43	15,60	21,10	114,00	31,30	
	5,0	8,38	10,70	62,10	2,41	17,00	23,20	124,00	34,00	
	5,6	9,31	11,90	67,80	2,39	18,60	25,50	136,00	37,10	
	6,3	10,40	13,20	74,10	2,37	20,30	28,10	148,00	40,60	
	7,1	11,50	14,70	80,70	2,34	22,10	31,00	161,00	44,20	

D (mm)	t (mm)	P (kg/m)	A (cm ²)	l (cm)	r (cm ³)	W (cm ³)	Z (cm ³)	J (cm ⁴)	W ₁ (cm ³)	U (m ² /m)
73,0	8,0	12,80	16,30	87,60	2,32	24,00	34,00	175,00	48,00	0,229
	8,8	13,90	17,70	93,20	2,29	25,50	36,50	186,00	51,00	
	10,0	15,50	19,80	101,00	2,26	27,60	40,00	201,00	55,20	
	11,0	16,80	21,40	106,00	2,23	29,10	42,70	212,00	58,20	
88,9	3,6	7,57	9,65	87,90	3,02	19,80	26,20	176,00	39,50	0,279
	4,0	8,38	10,70	96,30	3,00	21,70	28,90	193,00	43,30	
	4,5	9,37	11,90	107,00	2,99	24,00	32,10	213,00	47,90	
	5,0	10,30	13,20	116,00	2,97	26,20	35,20	233,00	52,40	
	5,6	11,50	14,70	128,00	2,95	28,70	38,90	255,00	57,50	
	6,3	12,80	16,30	140,00	2,93	31,50	43,10	280,00	63,10	
	7,1	14,30	18,20	154,00	2,90	34,60	47,60	308,00	69,20	
	8,0	16,00	20,30	168,00	2,87	37,80	52,50	336,00	75,60	
	8,8	17,40	22,10	180,00	2,85	40,40	56,70	359,00	80,90	
	10,0	19,50	24,80	196,00	2,81	44,10	62,60	392,00	88,20	
	11,0	21,10	26,90	208,00	2,78	46,90	67,20	417,00	93,70	
12,5	23,60	30,00	225,00	2,74	50,60	73,60	450,00	101,00		
101,60	4,0	9,63	12,30	146,00	3,45	28,80	38,10	293,00	57,60	0,319
	4,5	10,80	13,70	162,00	3,44	31,90	42,50	324,00	63,80	
	5,0	11,90	15,20	177,00	3,42	34,90	46,70	355,00	69,90	
	5,6	13,30	16,90	195,00	3,40	38,40	51,70	390,00	76,90	
	6,3	14,80	18,90	215,00	3,38	42,30	57,30	430,00	84,70	
	7,1	16,50	21,10	237,00	3,35	46,60	63,50	473,00	93,20	
	8,0	18,50	23,50	260,00	3,32	51,10	70,30	519,00	102,00	
	8,8	20,10	25,70	279,00	3,30	54,90	76,00	557,00	110,00	
	10,0	22,60	28,80	305,00	3,26	60,10	84,20	611,00	120,00	
	11,0	24,60	31,30	326,00	3,23	64,20	90,70	652,00	128,00	
12,5	27,50	35,00	354,00	3,18	69,70	99,90	708,00	139,00		
114,3	4,0	10,90	13,90	211,00	3,90	36,90	48,70	422,00	73,90	0,359
	4,5	12,20	15,50	234,00	3,89	41,00	54,30	469,00	82,00	
	5,0	13,50	17,20	257,00	3,87	45,00	59,80	514,00	89,90	
	5,6	15,00	19,10	283,00	3,85	49,60	66,20	566,00	99,10	
	6,3	16,80	21,40	313,00	3,82	54,70	73,60	625,00	109,00	
	7,1	18,80	23,90	345,00	3,80	60,40	81,70	690,00	121,00	
	8,0	21,00	26,70	379,00	3,77	66,40	90,60	759,00	133,00	
	8,8	22,90	29,20	409,00	3,74	71,50	98,20	817,00	143,00	
	10,0	25,70	32,80	450,00	3,70	78,70	109,00	899,00	157,00	
	11,0	28,00	35,70	482,00	3,67	84,30	118,00	963,00	169,00	
	12,5	31,40	40,00	526,00	3,63	92,00	130,00	1051,00	184,00	
	14,2	35,10	44,70	571,00	3,57	99,80	143,00	1141,00	200,00	

D (mm)	t (mm)	P (kg/m)	A (cm ²)	I (cm)	r (cm ³)	W (cm ³)	Z (cm ³)	J (cm ⁴)	W ₁ (cm ³)	U (m ² /m)
	5,0	16,80	21,40	498,00	4,82	70,50	92,90	996,00	141,00	
	5,6	18,70	23,90	550,00	4,80	77,90	103,00	1101,00	156,00	
	6,3	21,00	26,70	610,00	4,78	86,30	115,00	1220,00	173,00	
	7,1	23,50	29,90	676,00	4,75	95,60	128,00	1352,00	191,00	
	8,0	26,30	33,50	747,00	4,72	106,00	142,00	1494,00	211,00	
	8,8	28,80	36,60	807,00	4,69	114,00	155,00	1615,00	229,00	
	10,0	32,40	41,20	894,00	4,66	127,00	173,00	1788,00	253,00	
	11,0	35,30	45,00	962,00	4,62	136,00	187,00	1925,00	272,00	
	12,5	39,70	50,60	1059,00	4,58	150,00	208,00	2117,00	300,00	
	14,2	44,50	56,70	1159,00	4,52	164,00	230,00	2318,00	328,00	
	16,0	49,40	63,00	1256,00	4,47	178,00	253,00	2512,00	356,00	
	17,5	53,40	68,10	1330,00	4,42	188,00	270,00	2660,00	377,00	
141,3	5,0	20,10	25,70	856,00	5,78	102,00	133,00	1712,00	203,00	0,444
	5,6	22,50	28,60	948,00	5,76	113,00	148,00	1897,00	225,00	
	6,3	25,20	32,10	1053,00	5,73	125,00	165,00	2107,00	250,00	
	7,1	28,20	36,00	1170,00	5,70	139,00	185,00	2340,00	278,00	
	8,0	31,60	40,30	1297,00	5,67	154,00	206,00	2595,00	308,00	
	8,8	34,60	44,10	1407,00	5,65	167,00	224,00	2813,00	334,00	
	10,0	39,00	49,70	1564,00	5,61	186,00	251,00	3128,00	372,00	
	11,0	42,70	54,40	1689,00	5,57	201,00	273,00	3379,00	402,00	
	12,5	48,00	61,20	1868,00	5,53	222,00	304,00	3737,00	444,00	
	14,2	54,00	68,70	2058,00	5,47	245,00	338,00	4116,00	489,00	
	16,0	60,10	76,60	2244,00	5,41	267,00	372,00	4488,00	533,00	
	17,5	65,10	82,90	2388,00	5,37	284,00	400,00	4777,00	568,00	
	20,0	73,10	93,20	2608,00	5,29	310,00	443,00	5216,00	620,00	
	6,3	33,10	42,10	2386,00	7,53	218,00	285,00	4772,00	436,00	
	7,1	37,10	47,30	2660,00	7,50	243,00	319,00	5319,00	486,00	
	8,0	41,60	53,10	2960,00	7,47	270,00	357,00	5919,00	540,00	
	8,8	45,60	58,10	3220,00	7,44	294,00	389,00	6439,00	588,00	
	10,0	51,60	65,70	3598,00	7,40	328,00	438,00	7197,00	657,00	
219,1	11,0	56,50	71,90	3904,00	7,37	356,00	477,00	7807,00	713,00	0,688
	12,5	63,70	81,10	4345,00	7,32	397,00	534,00	8689,00	793,00	
	14,2	71,80	91,40	4820,00	7,26	440,00	597,00	9640,00	880,00	
	16,0	80,10	102,00	5297,00	7,20	483,00	661,00	10593,00	967,00	
	17,5	87,00	111,00	5673,00	7,15	518,00	713,00	11346,00	1036,00	
	20,0	98,20	125,00	6261,00	7,07	572,00	795,00	12523,00	1143,00	
	25,0	120,00	152,00	7298,00	6,92	666,00	947,00	14597,00	1332,00	

D (mm)	t (mm)	P (kg/m)	A (cm ²)	I (cm)	r (cm ³)	W (cm ³)	Z (cm ³)	J (cm ⁴)	W ₁ (cm ³)	U (m ² /m)
273,0	6,3	41,40	52,80	4696,00	9,43	344,00	448,00	9392,00	688,00	0,858
	7,1	46,60	59,30	5245,00	9,40	384,00	502,00	10491,00	769,00	
	8,0	52,30	66,60	5852,00	9,37	429,00	562,00	11703,00	857,00	
	8,8	57,30	73,00	6380,00	9,35	467,00	614,00	12760,00	935,00	
	10,0	64,90	82,60	7154,00	9,31	524,00	692,00	14308,00	1048,00	
	11,0	71,10	90,50	7783,00	9,27	570,00	756,00	15565,00	1140,00	
	12,5	80,30	102,00	8697,00	9,22	637,00	849,00	17395,00	1274,00	
	14,2	90,60	115,00	9695,00	9,16	710,00	952,00	19390,00	1421,00	
	16,0	101,00	129,00	10707,00	9,10	784,00	1058,00	21414,00	1569,00	
	17,5	110,00	140,00	11516,00	9,05	844,00	1144,00	23032,00	1687,00	
	20,0	125,00	159,00	12798,00	8,97	938,00	1283,00	25597,00	1875,00	
	25,0	153,00	195,00	15127,00	8,81	1108,00	1543,00	30254,00	2216,00	
	30,0	180,00	229,00	17162,00	8,66	1257,00	1780,00	34324,00	2515,00	
323,8	7,1	55,50	70,60	8861,00	11,20	547,00	712,00	17722,00	1095,00	1.017
	8,0	62,30	79,40	9901,00	11,20	612,00	798,00	19801,00	1223,00	
	8,8	68,40	87,10	10810,00	11,10	668,00	873,00	21619,00	1335,00	
	10,0	77,40	98,60	12147,00	11,10	750,00	985,00	24293,00	1501,00	
	11,0	84,90	108,00	13237,00	11,10	818,00	1077,00	26474,00	1635,00	
	12,5	96,00	122,00	14832,00	11,00	916,00	1212,00	29664,00	1832,00	
	14,2	108,00	138,00	16583,00	11,00	1024,00	1362,00	33166,00	2049,00	
	16,0	121,00	155,00	18372,00	10,90	1135,00	1517	36744,00	2270,00	
	17,5	132,00	168,00	19813,00	10,80	1224,00	1644,00	39626,00	2448,00	
	20,0	150,00	191,00	22117,00	10,80	1366,00	1849,00	44235,00	2732,00	
25,0	184,00	235,00	26374,00	10,60	1629,00	2237,00	52747,00	3258,00		
355,6	8,8	75,30	95,90	14423,00	12,30	811,00	1059,00	28846,00	1622,00	1.117
	10,0	85,20	109,00	16223,00	12,20	912,00	1195,00	32447,00	1825,00	
	11,0	93,50	119,00	17695,00	12,20	995,00	1307,00	35389,00	1990,00	
	12,5	106,00	135,00	19852,00	12,10	1117,00	1472,00	39704,00	2233,00	
	14,2	120,00	152,00	22227,00	12,10	1250,00	1656,00	44455,00	2500,00	
	16,0	134,00	171,00	24663,00	12,00	1387,00	1847,00	49326,00	2774,00	
	17,5	146,00	186,00	26631,00	12,00	1498,00	2002,00	53263,00	2996,00	
	20,0	166,00	211,00	29792,00	11,90	1676,00	2255,00	59583,00	3351,00	
25,0	204,00	260,00	35677,00	11,70	2007,00	2738,00	71353,00	4013,00		