



Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP  
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

Maycon Ricardo Sedrez

**Arquitetura e complexidade:  
a geometria fractal como sistema generativo.**

Campinas  
2016

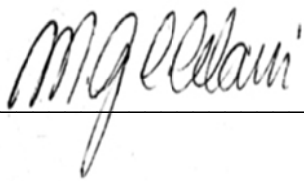
Maycon Ricardo Sedrez

**Arquitetura e complexidade:  
a geometria fractal como sistema generativo.**

Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), como parte dos requisitos exigidos 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 tese defendida pelo aluno Maycon Ricardo Sedrez e orientada pela Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani.



---

Campinas

2016

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** FAPESP, 2014/13572-5; CAPES; CNPq, 0203267/2014-1

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

Se29a Sedrez, Maycon Ricardo, 1978-  
Arquitetura e complexidade : a geometria fractal como sistema generativo /  
Maycon Ricardo Sedrez. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

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

1. Arquitetura e tecnologia. 2. Complexidade. 3. Fractals. 4. Projeto  
arquitetônico - Processamento de dados. I. Celani, Maria 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:** Architecture and complexity : fractal geometry as generative system

**Palavras-chave em inglês:**

Architecture and technology

Complexity

Fractals

Architectural design - Data processing

**Área de concentração:** Arquitetura, Tecnologia e Cidade

**Titulação:** Doutor em Arquitetura, Tecnologia e Cidade

**Banca examinadora:**

Maria Gabriela Caffarena Celani [Orientador]

Ana Maria Reis de Goes Monteiro

David Moreno Sperling

Alice Theresinha Cybis Pereira

José Manuel Pinto Duarte

**Data de defesa:** 23-02-2016

**Programa de Pós-Graduação:** Arquitetura, Tecnologia e Cidade

**Arquitetura e complexidade:  
a geometria fractal como sistema generativo.**

**Maycon Ricardo Sedrez**

Tese de doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

**Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani**

Presidente e Orientadora – Universidade Estadual de Campinas UNICAMP

**Prof. Dra. Ana Maria Reis de Goes Monteiro**

Universidade Estadual de Campinas UNICAMP

**Prof. Dr. José Manuel Pinto Duarte**

Pennsylvania State University

**Prof. Dr. David Moreno Sperling**

Universidade de São Paulo USP

**Prof. Dra. Alice Theresinha Cybis Pereira**

Universidade Federal de Santa Catarina UFSC

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

Campinas, 23 de fevereiro de 2016.



*"I move away from this place  
In the form of a disturbance  
And enter into the world  
Like some tiny distortion*

*If I surrender  
And I don't fight this wave  
No I won't go under  
I'll only get carried away*

*Wave*

*Wave*

*Wave*

*Isolation*

*Isolation*

*Isolation*

*Isolation "*

Wave by Beck (2014).

## Dedicatória

Dedico esta tese a meus pais, Manoel e Sueli, os quais deram todo suporte de que precisei ao longo desses anos de estudo.

## Agradecimentos

Agradeço a todos que de alguma maneira tornaram possível esse trabalho.

À professora **Gabriela Celani**, orientadora e companheira, por ser instigadora e incentivadora, por ser responsável e ética, tornou esse caminho muito mais fácil.

Aos **professores do Pós ATC**, por seu esforço em inspirar os alunos e melhorar o programa.

Aos professores da **banca examinadora**, por cederem um pouco do seu tempo para contribuir com esta tese.

Aos colegas **Jarryer de Martino, Letícia Teixeira Mendes, Giovana de Godoi, Rafael Meneghel**, por se tornarem grandes amigos e contribuírem sempre que solicitados.

Ao professor **Bauke de Vries**, por me receber na Universidade de Eindhoven permitindo o enriquecimento da pesquisa, bem como os demais professores da TU/e.

À professora **Justyna Karakiewicz**, por me receber na Universidade de Melbourne.

Aos arquitetos **Daniel Corsi** e **Vanessa Carlow** por cederem seu tempo e seus projetos para serem investigados nesta tese.

Aos profissionais entrevistados: **Anne Save de Beaurecueil, Arnold Walz, Daniel Corsi, Guto Requena, Inés Moisset, James Harris, Michael Hansmeyer, Michael Ostwald, Florian Gauss, Pieter Scheurs, Caroline Bos, Howard e Mark Raggatt**, por seu tempo e disponibilidade em responder meus questionamentos.

À minha colega arquiteta **Marjory Waiduschat** por compreender a minha necessidade de conhecer sempre mais.

À todos da minha família, em especial meus pais, **Manoel e Sueli**, e **Elenir**, por estarem constantemente acompanhando meus passos.

Aos amigos **Joselito Silva, Alexandre Marsola, Rogério do Nascimento, Renata Aoki, Adalberto Kossman, Jorge Belli, Tânia Baier** por estarem presentes enquanto eu estava imerso na pesquisa.

Aos funcionários do **LAPAC** e do **Programa de Pós-graduação Arquitetura, Tecnologia e Cidade**.

Aos alunos dos cursos de **Arquitetura e Urbanismo**, e **Engenharia Civil** da Unicamp.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior - CAPES (bolsa doutorado), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (bolsa doutorado sanduíche 203206/2014-1) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (bolsa doutorado 2014/13572-5).



Bolsa Capes

2012 – 2014



Bolsa Sanduíche CNPq Ciências sem Fronteiras

2015

Processo: 203267/2014-1



Bolsa Fapesp

2014 – 2016

Processo: 2014/13572-5

## Resumo

Um sistema generativo (SG) de formas consiste em um método sistemático para a obtenção de soluções para um dado problema. *Shape grammars*, *cellular automata*, algoritmos genéticos e **fractais** são alguns exemplos de SGs que permitem a criação de composições que podem ser aplicadas em arquitetura e urbanismo. Ao longo da história os arquitetos demonstraram interesse por formas complexas e utilizaram diferentes métodos para obtê-las. Com o advento da computação alguns SGs tradicionais foram implementados em computador ampliando as possibilidades de obtenção de formas complexas. Paralelamente, o surgimento dos meios de produção pós-industriais no final do século XX tornou possível a produção dessas formas com relativa facilidade e economia. Além disso, a renovação do ornamento na arquitetura contemporânea tem despertado o interesse para composições complexas. Dentre os SGs que têm sido utilizados por arquitetos contemporâneos, os fractais são particularmente interessantes porque permitem a geração de formas complexas a partir de regras simples em um processo inteligível no qual o controle por parte do projetista é mantido. Contudo, para que um arquiteto se aproprie efetivamente deste método, se faz necessária a introdução de uma série de conhecimentos e habilidades, bem como de um arcabouço teórico. Esta tese investiga o projeto de arquitetura utilizando geometria fractal (GF) e propõe maneiras de abordar esses conteúdos com o apoio de teorias e ferramentas contemporâneas, como os SGs de projeto, a modelagem paramétrica, os ambientes de programação de CAD e a fabricação digital. A metodologia desta pesquisa exploratória incluiu a revisão bibliográfica, análise de exemplos, entrevistas com arquitetos e experimentações com a GF como SG. Foi possível averiguar que a GF pode ser um método eficaz e factível, tendo em vista a disponibilidade de equipamentos de fabricação digital, para a geração de complexidade na arquitetura.

Palavras-chave: arquitetura contemporânea, complexidade, sistemas generativos, geometria fractal, fabricação digital.

## Abstract

*Architecture and complexity: fractal geometry as generative system.*

*A generative system of shapes is a systematic method to achieve solutions for a design problem. Shape grammars, cellular automata, genetic algorithms and fractals are some examples of generative systems that enable the creation of compositions to be applied in architecture and urban design. Throughout history the architects were interested by complex shapes and have used different methods to obtain complexity. With the use of computation some classic generative systems were implemented on computers expanding the possibilities to obtain complex shapes. At the same time, the arising of post-industrial means of production in the end of XX century made possible the production of those shapes easily and with economic viability. Moreover, the renovation of the ornament concept in the contemporary architecture is directly related to complex compositions. Among the generative systems that have been used by contemporary architects, fractals are particularly interesting because they generate complex shapes from simple rules in an intelligible process in which the designer control is preserved. However, to architects use fractals consistently, they must understand some concepts and acquire some abilities, and the architect must comprehend a theoretical framework. This thesis is an investigation of the design process that uses fractal geometry and it proposes ways of approach this subject with the support of theory and contemporary tools, as computational design and digital fabrication. The methodology of this exploratory research includes the literature review, case studies, interviews and applicatios of fractal geometry as generative system. It was possible to ascertain that the fractals may be an effective and feasible method, considering the digital fabrication equipments available, for the generation of complexity in architecture.*

*Keywords: contemporary architecture, complexity, generative systems, fractal geometry, digital fabrication.*

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Fractal parametrizado com regra de substituição, 4 iterações. ....	21
<b>Figura 2.</b> Pavilhão Barcelona. ....	21
<b>Figura 3.</b> Fundamentos para construção da tese. ....	26
<b>Figura 4.</b> Complexity and Contradiction in Architecture. ....	28
<b>Figura 5.</b> Casa Bavinger. ....	32
<b>Figura 6.</b> Jencks' Theory of Evolution in Architecture. ....	36
<b>Figura 7.</b> Post-modern evolutionary tree. ....	37
<b>Figura 8.</b> Security Marine Bank Wisconsin. ....	39
<b>Figura 9.</b> <i>Seed Cathedral</i> . ....	42
<b>Figura 10.</b> Caverna de Lascaux. ....	45
<b>Figura 11.</b> Pixel Building em primeiro plano. ....	50
<b>Figura 12.</b> John Lewis Store. ....	51
<b>Figura 13.</b> Formas fractais encontradas na natureza. ....	55
<b>Figura 14.</b> Samambaia. ....	57
<b>Figura 15.</b> Ilha de Koch. ....	58
<b>Figura 16.</b> IFS Samambaia. ....	59
<b>Figura 17.</b> L-systems. ....	59
<b>Figura 18.</b> Conjunto de Cantor. ....	62
<b>Figura 19.</b> Curva de Peano. ....	63
<b>Figura 20.</b> Curva de Peano (alterada). ....	63
<b>Figura 21.</b> Curva de Minkowski. ....	63
<b>Figura 22.</b> Triângulo de Sierpinski. ....	64
<b>Figura 23.</b> Tapete de Sierpinski. ....	64
<b>Figura 24.</b> Conjunto de Mandelbrot. ....	65
<b>Figura 25.</b> Conjunto de Julia. ....	66
<b>Figura 26.</b> Atrator Estranho. ....	66
<b>Figura 27.</b> 3B Caos Simétrico. ....	66
<b>Figura 28.</b> 8C. ....	66
<b>Figura 29.</b> <i>Sortie de Secours</i> . ....	66
<b>Figura 30.</b> Luminária Tulip (acesa). ....	67
<b>Figura 31.</b> Luminária Tulip. ....	67
<b>Figura 32.</b> Ilha de Koch e fortes renascentistas. ....	68
<b>Figura 33.</b> Assentamento Ba-Ila, Zâmbia. ....	70
<b>Figura 34.</b> Geometria do assentamento. ....	70
<b>Figura 35.</b> Geração de um templo Hindu. ....	71
<b>Figura 36.</b> Castelo Del Monte. ....	72
<b>Figura 37.</b> Cignet II. ....	72
<b>Figura 38.</b> Cignet III. ....	72
<b>Figura 39.</b> <i>Eros, Arrows and Other Errors</i> . ....	73
<b>Figura 40.</b> Cannaregio Town Square. ....	73
<b>Figura 41.</b> Casa Robbie. ....	75
<b>Figura 42.</b> Fractal Desk. ....	75
<b>Figura 43.</b> Sobreposição de escalas. ....	76
<b>Figura 44.</b> Frankfurt Biocentre. ....	78

<b>Figura 45.</b> Projeto do IUCAA.....	79
<b>Figura 46.</b> Projeto Belapur.....	79
<b>Figura 47.</b> Maquete física do ESTEC.....	79
<b>Figura 48.</b> <i>Open House</i> .....	80
<b>Figura 49.</b> Storey Hall.....	86
<b>Figura 50.</b> Ladrilhos de Penrose.....	86
<b>Figura 51.</b> Projeto de extensão do Museu Victoria and Albert.....	87
<b>Figura 52.</b> Fractile.....	87
<b>Figura 53.</b> Esponja de Menger.....	87
<b>Figura 54.</b> Escritórios Sarphatistraat.....	87
<b>Figura 55.</b> Estrutura da fachada.....	88
<b>Figura 56.</b> Auditório Federation Square.....	88
<b>Figura 57.</b> Geração dos mega-painéis.....	88
<b>Figura 58.</b> Detalhe da fachada Federation Square.....	89
<b>Figura 59.</b> Projeto da nuvem fractal.....	89
<b>Figura 60.</b> Maquete do projeto.....	89
<b>Figura 61.</b> Fachada Museu Egípcio, Heneghan Peng.....	90
<b>Figura 62.</b> Detalhe da fachada, Heneghan Peng.....	90
<b>Figura 63.</b> <i>Liquid crystal glass house</i> .....	91
<b>Figura 64.</b> Projeto da fachada <i>The Cube</i> .....	91
<b>Figura 65.</b> <i>The Cube</i> .....	91
<b>Figura 66.</b> Estrutura Restaurante Tote.....	92
<b>Figura 67.</b> Processo generativo.....	92
<b>Figura 68.</b> Curva de Hilbert, iterações e modelo usinado.....	93
<b>Figura 69.</b> Zilverparkkade.....	93
<b>Figura 70.</b> Desenho da fachada.....	93
<b>Figura 71.</b> Estrutura Fractal – Pavilhão A.A. School.....	94
<b>Figura 72.</b> Restaurante Olivomare.....	95
<b>Figura 73.</b> Planificação das paredes.....	95
<b>Figura 74.</b> Implantação/cobertura Louvre Abu Dhabi.....	95
<b>Figura 75.</b> Domus Louvre Abu Dhabi.....	96
<b>Figura 76.</b> Estrutura Indústrias Hus.....	96
<b>Figura 77.</b> Auditório Saint Cyprien.....	97
<b>Figura 78.</b> Processo generativo Saint Cyprien.....	97
<b>Figura 79.</b> Processo generativo do projeto.....	98
<b>Figura 80.</b> Fachada <i>Embedded Project</i> .....	98
<b>Figura 81.</b> Fachada Museu Exploratório de Ciências.....	98
<b>Figura 82.</b> Processo Generativo.....	99
<b>Figura 83.</b> Projeto do edifício KAFD.....	99
<b>Figura 84.</b> Proposta para o concurso Busan Ópera.....	100
<b>Figura 85.</b> Processo generativo para a cobertura.....	100
<b>Figura 86.</b> Escala do projeto Beyond infinity.....	101
<b>Figura 87.</b> Beyond infinity.....	101
<b>Figura 88.</b> Processo generativo <i>Fractal Forest</i> .....	102
<b>Figura 89.</b> Projeto <i>Fractal Forest</i> construído.....	102
<b>Figura 90.</b> <i>Curdling</i> .....	106
<b>Figura 91.</b> Processo generativo.....	110
<b>Figura 92.</b> Formas alternativas baseadas em dimensões fractais.....	112



<b>Figura 93.</b> Traçado Regulador.....	112
<b>Figura 94.</b> Módulos fractais bidimensionais.....	112
<b>Figura 95.</b> Cruzamento de classes de design, métodos e ferramentas.....	114
<b>Figura 96.</b> Demolição do conjunto habitacional Pruitt-Igoe.....	115
<b>Figura 97.</b> Casa Palmer.....	123
<b>Figura 98.</b> Iterações de triângulos.....	123
<b>Figura 99.</b> Hibridização de objetos.....	124
<b>Figura 100.</b> Projeto com união de partes.....	125
<b>Figura 101.</b> Concha reticulada.....	125
<b>Figura 102.</b> <i>Spatial conceptual structure</i> .....	126
<b>Figura 103.</b> Formas geradas pelo CADaFED.....	126
<b>Figura 104.</b> <i>Reading table</i> .....	127
<b>Figura 105.</b> Padrão recursivo.....	128
<b>Figura 106.</b> Objeto final.....	128
<b>Figura 107.</b> Abordagem tradicional do projeto e abordagem do projeto generativo.....	136
<b>Figura 108.</b> Abordagem dos SGs com múltiplas soluções.....	136
<b>Figura 109.</b> Embedded Project, HDD FUN.....	152
<b>Figura 110.</b> Fractal truss.....	153
<b>Figura 111.</b> <i>House #20</i> .....	156
<b>Figura 112.</b> <i>Form #25</i> .....	156
<b>Figura 113.</b> Modelo 3D.....	157
<b>Figura 114.</b> Centro Pompidou Metz.....	163
<b>Figura 115.</b> <i>L-systems, using three modules as leaves</i> .....	165
<b>Figura 116.</b> <i>Four columns</i> .....	166
<b>Figura 117.</b> Coluna exposta na ETH.....	166
<b>Figura 118.</b> Colunas na Bienal de Gwangju.....	167
<b>Figura 119.</b> Design rendering Digital Grotesque.....	168
<b>Figura 120.</b> Diagramas do projeto Digital Grotesque.....	169
<b>Figura 121.</b> Instalação do projeto Digital Grotesque.....	170
<b>Figura 122.</b> 1ª Fase Museu de Ciências da Unicamp.....	171
<b>Figura 123.</b> Processo Generativo do Museu de Ciências.....	173
<b>Figura 124.</b> 2ª Fase Museu de Ciências da Unicamp.....	173
<b>Figura 125.</b> Dez Painéis.....	174
<b>Figura 126.</b> Ateliê de Cibercostura.....	177
<b>Figura 127.</b> Coleção Era uma vez.....	178
<b>Figura 128.</b> Cadeira Noize.....	180
<b>Figura 129.</b> Parâmetros Love Project.....	181
<b>Figura 130.</b> Nossa Senhora Des-Aparecida.....	182
<b>Figura 131.</b> Chineses cultivando chá no Jardim Botânico.....	183
<b>Figura 132.</b> Processo generativo: criação de pixels e seleção de pontos (brancos).....	183
<b>Figura 133.</b> Triangulação de Delauney.....	184
<b>Figura 134.</b> Tapete Tea Hug.....	184
<b>Figura 135.</b> Banco Samba.....	186
<b>Figura 136.</b> Theatre Agora Externo.....	188
<b>Figura 137.</b> Theatre Agora Interno.....	188
<b>Figura 138.</b> Music Theatre.....	189
<b>Figura 139.</b> A2 Cockpit.....	190
<b>Figura 140.</b> Projeto paramétrico A2 Cockpit.....	191

<b>Figura 141.</b> Elementos e nós fabricados. ....	192
<b>Figura 142.</b> Fachada do Grande Museu Egípcio. ....	196
<b>Figura 143.</b> Instalação dos painéis Centro Cultural Heidar Alyiev. ....	197
<b>Figura 144.</b> Fabricação manual dos painéis. ....	198
<b>Figura 145.</b> Storey Hall e RMIT 22. ....	201
<b>Figura 146.</b> Detalhe Storey Hall e RMIT 22. ....	202
<b>Figura 147.</b> Painel de concreto ornamentado. ....	203
<b>Figura 148.</b> Painéis acústicos ornamentados. ....	203
<b>Figura 149.</b> Triângulo equilátero e coordenadas. ....	207
<b>Figura 150.</b> Estudo com duas iterações. ....	207
<b>Figura 151.</b> Estudo com automação do código. ....	208
<b>Figura 152.</b> Objeto com 4 iterações para triângulos genéricos. ....	210
<b>Figura 153.</b> Iterações 1 a 4 do Conjunto de Cantor. ....	211
<b>Figura 154.</b> Componente Python para Conjunto de Cantor. ....	211
<b>Figura 155.</b> Iterações 1 a 4 da curva de Koch. ....	212
<b>Figura 156.</b> Três variações de parâmetros no código. ....	213
<b>Figura 157.</b> Componente Python para curva de Koch. ....	213
<b>Figura 158.</b> Quatro iterações da Ilha de Koch. ....	214
<b>Figura 159.</b> Oito variações da Ilha de Koch. ....	215
<b>Figura 160.</b> Componente Python para Ilha de Koch. ....	215
<b>Figura 161.</b> Quatro iterações da curva de Minkowski. ....	217
<b>Figura 162.</b> Quatro variações da curva de Minkowski. ....	217
<b>Figura 163.</b> Componente Python para curva de Minkowski. ....	217
<b>Figura 164.</b> Quatro iterações da curva de Peano. ....	219
<b>Figura 165.</b> Variações da curva de Peano. ....	220
<b>Figura 166.</b> Componente Python da curva de Peano. ....	220
<b>Figura 167.</b> Décima iteração da curva Dragão. ....	222
<b>Figura 168.</b> Três variações da curva Dragão. ....	223
<b>Figura 169.</b> Componente Python da curva Dragão. ....	223
<b>Figura 170.</b> Componente Hoopsnake. ....	226
<b>Figura 171.</b> Objeto com 5 iterações. ....	226
<b>Figura 172.</b> Objeto com o código aperfeiçoado. ....	227
<b>Figura 173.</b> Objeto construído com 5 lados. ....	227
<b>Figura 174.</b> Triângulo de Sierpinski gerado. ....	228
<b>Figura 175.</b> Código Grasshopper para o Triângulo de Sierpinski. ....	228
<b>Figura 176.</b> Ilha de Koch gerado. ....	229
<b>Figura 177.</b> Código da Ilha de Koch. ....	229
<b>Figura 178.</b> Curva de Peano gerada. ....	230
<b>Figura 179.</b> Código da curva de Peano. ....	230
<b>Figura 180.</b> Curva de Minkowski gerada. ....	231
<b>Figura 181.</b> Código da curva de Minkowski. ....	231
<b>Figura 182.</b> Curva fractal gerada pelo autor. ....	232
<b>Figura 183.</b> Código da curva gerada pelo autor. ....	232
<b>Figura 184.</b> Croqui elaborado pelas alunas para a proposta de coluna fractal. ....	234
<b>Figura 185.</b> Geração da coluna. ....	234
<b>Figura 186.</b> Variação na altura da coluna. ....	235
<b>Figura 187.</b> Variação na proporção do fuste. ....	235
<b>Figura 188.</b> Variação no ângulo de abertura dos ramos. ....	235

<b>Figura 189.</b> Variação do diâmetro dos tubos.....	235
<b>Figura 190.</b> Variação na posição dos ramos.....	236
<b>Figura 191.</b> Código Grasshopper colunas.....	236
<b>Figura 192.</b> Renderização de uma das alternativas.....	237
<b>Figura 193.</b> Simulação de insolação: inverno 17:00 e verão 17:00.....	238
<b>Figura 194.</b> Simulação de insolação: junho e dezembro.....	239
<b>Figura 195.</b> Análise no Heliodon: verão 17:00.....	239
<b>Figura 196.</b> Croqui inicial.....	239
<b>Figura 197.</b> <i>Lines, pipes, planes e cuts</i> .....	240
<b>Figura 198.</b> Detalhe da projeção da sombra com <i>pipes e planes</i> .....	241
<b>Figura 199.</b> Detalhe interno da fachada do Wuzhen Theater.....	241
<b>Figura 200.</b> Variações nos 24 painéis.....	242
<b>Figura 201.</b> Um único fractal nos 24 painéis.....	242
<b>Figura 202.</b> Detalhe dos desenhos gerados e da edição do desenho.....	242
<b>Figura 203.</b> Detalhe dos painéis do Orange Cube.....	243
<b>Figura 204.</b> Detalhe do corte nas chapas perfuradas.....	243
<b>Figura 205.</b> Algoritmo de perfuração e detalhe dos furos.....	244
<b>Figura 206.</b> Variações no código do fractal.....	244
<b>Figura 207.</b> Proposta final.....	245
<b>Figura 208.</b> Modelo físico final.....	245
<b>Figura 209.</b> Detalhe de um dos 120 painéis usinado em alumínio.....	245
<b>Figura 210.</b> Detalhes de fixação dos painéis.....	245
<b>Figura 211.</b> Projeção de luz e sombra no interior: verão.....	246
<b>Figura 212.</b> Projeção de luz e sombra no interior: verão.....	246
<b>Figura 213.</b> Conceito do projeto Auditório Saint-Cyprien.....	247
<b>Figura 214.</b> Código em Python para <i>Fractal Tree</i> .....	247
<b>Figura 215.</b> Variações com dois ramos: 30, 45 e 90 graus; sete iterações.....	248
<b>Figura 216.</b> Variações com três ramos: 30, 45 e 90 graus; sete iterações.....	248
<b>Figura 217.</b> Conceito do projeto Grand Egyptian Museum.....	249
<b>Figura 218.</b> Código em Python para Triângulo de Sierpinski.....	249
<b>Figura 219.</b> Figura inicial, iterações 1, 2 e 7 do Triângulo de Sierpinski.....	250
<b>Figura 220.</b> Processo generativo 1.....	251
<b>Figura 221.</b> Processo generativo 2.....	251
<b>Figura 222.</b> Quatro painéis iniciais.....	252
<b>Figura 223.</b> Dez painéis iniciais.....	252
<b>Figura 224.</b> Passos para gerar o padrão alterando parâmetros.....	254
<b>Figura 225.</b> Painéis gerados com iterações.....	254
<b>Figura 226.</b> 10 painéis gerados com iterações, e <i>attractors</i> .....	255
<b>Figura 227.</b> Painéis gerados individualmente com iterações e <i>attractors</i> .....	255
<b>Figura 228.</b> Testes de usinagem em chapa de alumínio com CNC.....	256
<b>Figura 229.</b> Código Grasshopper Fachada Fractal (Fonte: Do autor, 2016).....	257
<b>Figura 230.</b> Processo generativo Diamniadio.....	259
<b>Figura 231.</b> Processo generativo, iterações 1,2 e3.....	259
<b>Figura 232.</b> Soluções A, B e C.....	260
<b>Figura 233.</b> Fases de desenvolvimento do projeto.....	260
<b>Figura 234.</b> Solução Final.....	261
<b>Figura 235.</b> Projeto COBE.....	261
<b>Figura 236.</b> Código Grasshopper Diamniadio. (Fonte: Do autor, 2016).....	262

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1.</b> Diferenças entre o pensamento contemporâneo. ....	30
<b>Tabela 2.</b> Comparação entre sistemas lineares e não lineares. ....	31
<b>Tabela 3.</b> Comparação entre geometria fractal e euclidiana.....	56
<b>Tabela 4.</b> Categorias de fractais não lineares e lineares. ....	61
<b>Tabela 5.</b> Palestrantes da Conferência Inphiniart. ....	82
<b>Tabela 6.</b> Número de retornos nos periódicos científicos selecionados. ....	104
<b>Tabela 7.</b> Número de retornos em base de dados. ....	104
<b>Tabela 8.</b> <i>Summary and analysis</i> : análise da forma. ....	117
<b>Tabela 9.</b> <i>Summary and analysis</i> : geração de forma. ....	118
<b>Tabela 10.</b> Diferenciais semânticos – Geometria Fractal. ....	120

## Lista de Quadros

<b>Quadro 1.</b> Arquitetura e fractais.....	69
<b>Quadro 2.</b> Principais referências sobre fractais e arquitetura.....	74

## Lista de Abreviações

CAD – *Computer-Aided Design*

CAAD – *Computer-Aided Architectural Design*

CAM – *Computer-Aided Manufacturing*

CAAM – *Computer-aided Architectural Manufacturing*

CNC – *Computer Numerical Controlled*

BIM – *Building Information Modelling ou Model*

IFC – *Industry Foundation Classes*

IFS – *Iterated Function System*

GF – Geometria Fractal

MRCM – *Multiple Reduction Copy Machine*

STL – *STereoLithography*

SG – Sistema Generativo

VBA – *Visual Basic for Applications*

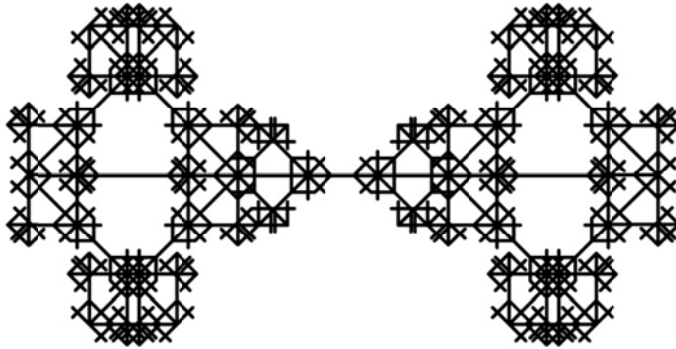
## Sumário

Dedicatória .....	6
Agradecimentos.....	7
Resumo.....	9
Abstract .....	10
Lista de Figuras .....	11
Lista de Tabelas.....	16
Lista de Quadros .....	17
Lista de Abreviações .....	18
Sumário .....	19
1. Introdução .....	21
1.1 Objetivos .....	24
1.2 Metodologia .....	25
1.3 Estrutura da tese .....	27
2 Arquitetura e Complexidade .....	28
2.1 Evolução dos movimentos em arquitetura .....	36
2.2 Novo Ornamento.....	44
3 Geometria Fractal.....	55
3.1 Fractais Lineares .....	62
3.2 Fractais não-lineares .....	65
4 Arquitetura e Fractais.....	68
4.1 Aplicações em arquitetura.....	69
4.2 Aplicações contemporâneas .....	83
4.2.1 Projetos.....	86
4.3 Revisão da Literatura .....	103
4.3.1 Análise de percepção.....	106
4.3.2 Análise urbana.....	108
4.3.3 Ensino de projeto.....	110
4.3.4 Crítica teórica e conceitual .....	114
4.3.5 Prática arquitetônica .....	122
5 Novas tecnologias e fabricação digital.....	129
5.1 Projeto Generativo .....	136
6 Materiais e métodos .....	141
7 Entrevistas .....	142
7.1 Entrevista Michael Ostwald .....	144
7.2 Entrevista Inés Moisset .....	150

7.3 Entrevista James Harris.....	154
7.4 Entrevista Anne Save de Beaurecueil .....	158
7.5 Entrevista Arnold Walz.....	162
7.6 Entrevista Michael Hansmeyer .....	165
7.7 Entrevista Daniel Corsi .....	171
7.8 Entrevista Guto Requena.....	177
7.9 Entrevista Caroline Bos.....	187
7.10 Entrevista Pieter Schreurs .....	190
7.11 Entrevista Florian Gauss .....	195
7.12 Entrevista ARM .....	200
8 Aplicações .....	205
8.1 Implementação computacional de fractais .....	206
8.2 Aplicativos para gerar fractais 3D.....	206
8.3 Linguagem textual: VBA .....	206
8.4 Linguagem textual: Python .....	210
8.5 Linguagem visual: Grasshopper.....	225
8.6 Aplicações em projeto.....	233
8.6.1 Projeto novo: Ensino de Projeto .....	234
8.6.2 Projeto novo: Projeto de Fachada.....	238
8.6.3 Projeto existente: Auditório Saint-Cyprien .....	247
8.6.4 Projeto existente: Grand Egyptian Museum.....	249
8.6.5 Projeto existente, análise: Museum de Ciências Unicamp .....	251
8.6.6 Projeto existente, inovação: Diamniadio .....	258
9 Conclusão .....	263
10 Referências.....	271



**Figura 1.** Fractal parametrizado com regra de substituição, 4 iterações.



Fonte: Do autor, 2016.

## 1. Introdução

*“Truly, humanity had been familiar with fractals since time immemorial”* Benoît Mandelbrot.

Em certos períodos da história as formas complexas foram notadamente valorizadas pelos arquitetos, por exemplo, na arquitetura Gótica, Barroca e *Art Nouveau*. Sendo as formas arquitetônicas uma expressão de valores estéticos e simbólicos, elas tendem a refletir o momento cultural de uma época. Nos períodos citados a produção de ornamentação ainda estava ligada a métodos de manufatura artesanais que consumiam muito tempo e material.

No movimento moderno da arquitetura esse paradigma se alterou. Diversos fatores contribuíram para essa mudança, dentre eles a necessidade de construir mais e com maior rapidez, além de uma postura ideológica contra a ornamentação promovida por alguns arquitetos modernistas. Isso levou a uma arquitetura de formas Platônicas, “puras”, e a complexidade de formas desapareceu na arquitetura de um modo geral. Em alguns casos a ornamentação produzida pelo pelos seres humanos foi substituída pela complexidade naturalmente presente em certos materiais, como o mármore (**Figura 2**).

**Figura 2.** Pavilhão Barcelona.



Projeto do arquiteto Mies van der Rohe. Fonte: Dalen, 2008.

No início da década de 80 os arquitetos produziam novamente obras buscando complexidade de formas (VENTURI, 1995; JENCKS, 2002; JENCKS, 1997b). A teoria da Complexidade e a teoria do Caos, surgidas na década de 70 (CAPRA, 1996), desempenharam um papel fundamental no ressurgimento da complexidade em arquitetura naquele momento. No início esta apropriação de conceitos da Complexidade se deu como uma crítica ao movimento modernista, na qual os arquitetos propuseram a ornamentação com significados e simbolismos (VENTURI, IZENOUR, BROWN, 1972). A complexidade, então, aparece como um movimento de reação às formas puras da arquitetura moderna, buscando uma reflexão sobre esse momento pós-industrial.

É importante explicar que o movimento em direção a simplificação estava relacionado aos meios de produção industrial. Enquanto que o movimento em direção à complexidade, de modo semelhante, acompanha a tendência da indústria a incorporar novos métodos que viabilizam realizar formas mais complexas de modo econômico. Assim, na arquitetura contemporânea a abordagem da complexidade ressurge de uma maneira renovada, com o suporte de novos métodos e tecnologias; e os arquitetos se apoiam em conhecimentos matemáticos e geométricos para a produção de tal complexidade (FISCHER, HERR, 2001; BURRY, BURRY, 2010).

No que se refere aos métodos de projeto contemporâneos, estes possuem ferramentas computacionais que possibilitam a geração de formas complexas, outras ferramentas permitem analisar e avaliar o edifício por meio de programas de análise de desempenho. Além disso, os recentes avanços nas tecnologias de processo construtivo disponibilizaram equipamentos para a produção de detalhes ou partes do edifício de maneira automatizada. Kolarevic e Klinger (2008:13) afirmam que no começo dos anos 2000 “*infatuation with complex geometry [...] was replaced by the exploration of highly crafted, non-uniform surface effects based on complex patterning, texturing or relief*”, os autores chamam esses projetos de “*ornamented minimalism*”.

Uma possibilidade de alcançar complexidade no projeto arquitetônico são os Sistemas Generativos (SGs): *shape grammars*, algoritmos genéticos, fractais, etc. Os SGs são apropriados para uma abordagem dos métodos de projeto contemporâneos, pois sua criação é potencializada pelo uso de computadores, que podem ser vistos como uma extensão da mente humana (TERZIDIS, 2006). A Geometria Fractal (GF) é um exemplo de SG que permite gerar formas complexas por meio de regras simples facilitando a compreensão de conceitos fundamentais como recursão, iteração e escalas.

A aplicação da GF no projeto de arquitetura é um tema que vem sendo explorado ao longo das últimas décadas por diversos pesquisadores (BOVILL, 1996; MOISSET, 2003; HAGGARD, COOPER, GYOVAI, 2006; SALINGAROS, 2005; OSTWALD, 2009). Contudo existem incertezas, especialmente no que diz respeito ao discurso teórico e à prática, por exemplo, por um lado existe a dificuldade de geração de fractais pelos arquitetos, e por outro, o entendimento do que é arquitetura com aspectos fractais pelos matemáticos (OSTWALD, 2009).

Esta pesquisa tem como base duas perguntas, as quais se pretende responder com os procedimentos metodológicos adotados:

### **A GF pode contribuir para a arquitetura como SG?**

### **Como os arquitetos podem se apropriar das formas fractais no projeto?**

Sendo assim, a **hipótese** da pesquisa consiste na seguinte afirmativa: a utilização de ferramentas e métodos contemporâneos de geração de geometria e fabricação de partes do edifício - programação, SGs, fabricação digital - permite aos arquitetos obterem resultados complexos. Além disso, a geração automatizada de formas facilita os processos de avaliação e análise computacional das mesmas.

Esta tese explora os novos métodos de projeto abordando a ornamentação contemporânea e a complexidade na arquitetura. Pretende-se realizar uma discussão sobre o papel e o lugar da GF, implementada em computador e utilizando recursos de fabricação digital, como SG na arquitetura, descobrindo porque é útil e quando é apropriada.

## 1.1 Objetivos

O objetivo desta tese é estudar as aplicações recentes dos fractais na arquitetura como sistema generativo, investigando seus métodos e procedimentos e explicitando sua contribuição para a arquitetura e para a formação dos seus profissionais, com ênfase no aspecto da complexidade.

Objetivos secundários:

1. Fundamentação teórica: identificar as origens e estudar os métodos generativos da GF.
2. Levantamento de exemplos: identificar e categorizar exemplos contemporâneos de aplicação do conceito de fractal na arquitetura.
3. Revisão da literatura: identificar a presença da GF em projetos de pesquisa recentes na área de projeto de arquitetura.
4. Estudos de caso: realizar estudos aprofundados sobre alguns dos exemplos identificados, por meio de análises gráficas, modelagem geométrica e matemática, incluindo a produção de projetos e de maquetes e protótipos; visitas em campo; entrevistas com os arquitetos; identificação dos métodos de projeto e fabricação, etc.

## 1.2 Metodologia

Arquitetos frequentemente emprestam conceitos de outros campos do conhecimento para legitimar a sua prática (OSTWALD, 2009). Esta pesquisa, por meio dos procedimentos metodológicos, pretende explicitar o conhecimento existente sobre a GF em arquitetura e descrever orientações que possibilitem a compreensão de como os fractais se inserem no processo de projeto, revelando assim as contribuições deste SG para arquitetura

Fatores culturais, tecnológicos, econômicos e ecológicos influenciam nos métodos de pesquisa em projeto arquitetônico. Breen (2002:97) explica: “[a]rchitectural design is a development process which is both creative and rational, drawing from a wide range of knowledge and experience, concerning technical, practical and cultural aspect”. Esta tese concentra um esforço em compreender como questões tecnológicas vêm modificando a visão dos arquitetos na busca por alcançar formas complexas, trazendo ainda alguns aspectos culturais presentes neste processo.

Como o objeto de pesquisa envolve questões de natureza prática e teórica, a metodologia de pesquisa adotada para a elaboração desta tese foi a pesquisa exploratória, pois permite ao pesquisador ter uma visão ampla do problema em seus diferentes aspectos. Breen (*ibid.*) explica o que a pesquisa exploratória envolve as perguntas centrais: “o que?”, “como?” e “por que?”; neste caso, o que é arquitetura com aspectos fractais, como gerar esse tipo de projeto e os motivos para tal abordagem.

A pesquisa exploratória está situada entre a pesquisa descritiva e pesquisa empírica, por isso, a **pesquisa exploratória** proporciona uma explicação sistemática do objeto de estudo, bem como uma avaliação sistemática do problema. A pesquisa exploratória também permite criar maior familiaridade com o problema tornando-o explícito por meio de **levantamento bibliográfico, entrevistas e análise de exemplos**. Breen (*ibid.*:138) acrescenta: “[t]he point of departure is usually a set of notions or assumptions. The aim is to create insights: to identify, define and illustrate relevant phenomena, to explain specific characteristics and effects and (inter)relationships”.

A pesquisa exploratória envolve também a utilização de métodos experimentais, nesta tese os experimentos serão realizados sob o contexto das novas tecnologias para o projeto. Este tipo de pesquisa voltada para a prática tem um grande potencial de contribuição para o ensino e prática profissional. Os métodos computacionais de projeto não são mencionados em livros de metodologia científica. Apenas recentemente, na segunda edição de

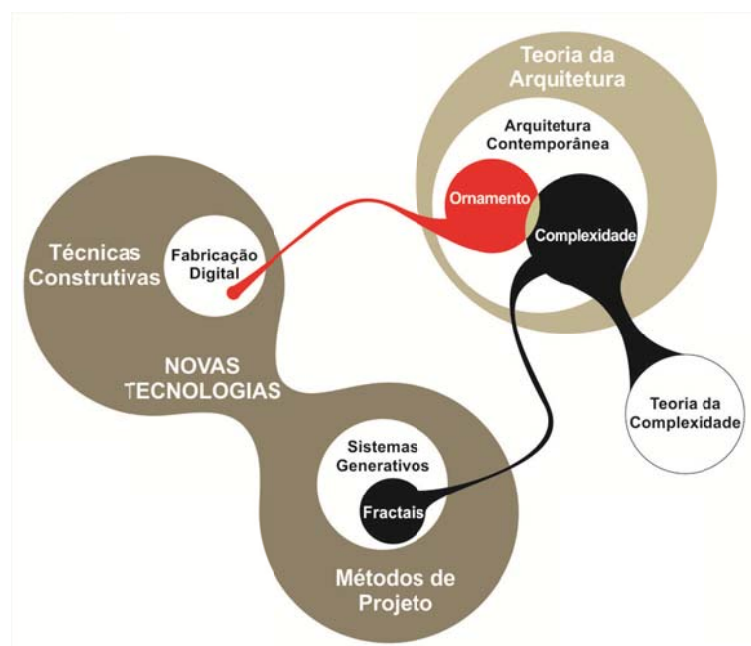
seu livro sobre métodos de pesquisa em arquitetura, Groat e Wang (2013) passam a considerá-los como métodos de pesquisa.

Groat e Wang (*ibid.*) classificam as teorias computacionais de geração da forma como um método de argumentação lógica. Os autores (*ibid.*) citam as tecnologias de fabricação digital e de modelagem paramétrica no capítulo de pesquisa experimental. Para os autores (*ibid.*), a produção de um projeto de arquitetura também se caracteriza como um método de pesquisa experimental. De maneira semelhante, Iwamoto (2009:4) também considera que o processo de projeto pode se constituir em um método de pesquisa: “[h]ere, the architectural project is a form of applied design research”.

Nesta tese a **coleta de dados** envolve procedimentos formais: revisões da literatura e procedimentos informais: elaboração de projetos, entrevistas. Estes dados são interpretados e organizados sob tópicos que refletem os capítulos da tese. A organização das informações é realizada de maneira intuitiva, pois muitos dados são subjetivos. Quanto aos procedimentos esta tese adota a abordagem da pesquisa-ação, que pressupõe uma ação do pesquisador ao tratar um problema de forma participativa ou colaborativa. A metodologia de pesquisa envolveu, além de extensa revisão da literatura com pesquisa bibliográfica (literatura cinza) e pesquisa eletrônica (*mapping study*), a identificação de exemplos de aplicação de fractais na arquitetura, visitas técnicas, entrevistas semiestruturadas e estruturadas com arquitetos e a realização de aplicações de GF na arquitetura por meio de projeto.

A **Figura 3** apresenta a delimitação do escopo conceitual da pesquisa.

**Figura 3.** Fundamentos para construção da tese.



Fonte: Do autor, 2016.

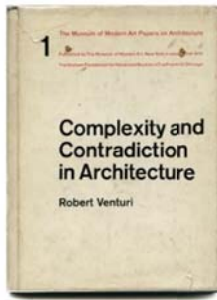
### 1.3 Estrutura da tese

Esta tese está dividida em 9 capítulos, tratando os temas de uma forma abrangente até uma explicação detalhada. O capítulo 1 é a introdução da tese que situa brevemente o leitor sobre o que será pesquisado e como será conduzida a pesquisa, metodologia e estrutura da tese. Em seguida o capítulo 2, trata da Arquitetura e da Complexidade no período contemporâneo, explicando o que se entende por complexidade em arquitetura e o que é o novo ornamento.

No capítulo 3 explica-se o que é a GF e quais são as relações geométricas que podem interessar para esta pesquisa. O capítulo 4 continua ampliando os conhecimentos do capítulo anterior ao relacionar a arquitetura com fractais por meio das pesquisas em arquitetura e com os projetos de arquitetura fractal mais significativos, também apresenta a revisão da literatura.

O capítulo 5 aborda as novas tecnologias para o projeto, concentrando em projeto generativo e fabricação digital, úteis para a construção da arquitetura contemporânea e novo ornamento. O capítulo 6 explica os materiais e métodos utilizados na investigação do tema.

O capítulo 7 traz uma análise de cada uma das entrevistas realizadas, e no capítulo 8 os exercícios de aplicação da geometria fractal são apresentados. Finalizando esta tese com a conclusão no capítulo 9.

**Figura 4.** Complexity and Contradiction in Architecture.

Capa original do livro. Fonte: Venturi, 1966.

## 2 Arquitetura e Complexidade

“A Teoria da Complexidade nos impulsiona para uma visão mais holística” Michael Batty.

Neste capítulo são explicados conceitos da teoria da Complexidade, suas origens e como tem influenciado a arquitetura nas últimas décadas. O objetivo deste capítulo é possibilitar um entendimento da complexidade enquanto método de abordagem do projeto de arquitetura contemporânea.

### O problema da terminologia.

A Teoria da Complexidade é um campo da ciência que estuda os fenômenos complexos e tem sua origem nas ciências naturais, especialmente na física e biologia. Em sua formulação original, a Teoria da Complexidade lidava com sistemas complexos, emergência<sup>1</sup>, dinâmica não-linear, teoria do caos e auto-organização<sup>2</sup>, conceitos desenvolvidos nas décadas de 60 e 70. Contudo, desde a publicação do livro Complexidade e Contradição na Arquitetura de Robert Venturi em 1966, os termos complexidade e complexo vêm se desgastando pelo extenso uso em teoria arquitetônica. Por exemplo, Burry e Burry (2010) afirmam: “[c]omplexity is a term that has been widely used to mean anything that is not simple [...]”, criando simplificações e muitas vezes um entendimento errôneo do termo.

O problema das terminologias Complexidade e Complexo em arquitetura têm provocado reações adversas quanto ao uso dessa teoria (OSTWALD, 2009). A confusão entre a teoria e a terminologia levanta questões como a de Jencks (1997b) “[...] *how much do architects understand of fractals, emergence theory, folding, nonlinearity and self-organising systems?*”. Jencks (2002) explica que aparentemente duas teorias se desenvolveram em paralelo na arquitetura e nas ciências. Resumidamente poderia se explicar os conceitos:

<sup>1</sup>Emergência: o sistema exibe propriedades que emergem de iterações dos seus elementos.

<sup>2</sup>Auto-organização: é a capacidade do sistema de mudar autonomicamente sua própria organização em resposta a eventos externos ou internos (cardume de peixes).



**Complexo:** Fenômeno que consiste de partes interconectadas, difícil de analisar e compreender. Refere-se a um conjunto de coisas e como elas estão organizadas, e significa multiplicidade sem um padrão aparentemente definido.

**Complexidade:** A quantidade de informação para descrever um fenômeno. Supõe o caos com ordem subjacente.

Jencks (1997b) confirma a quantidade de termos em relação à complexidade:

*“Complexity is the theory of how emergent organisation may be achieved by interacting components pushed far from equilibrium (by increasing energy, matter or information) to be threshold between order and chaos. This important border or threshold is where the system often jumps, bifurcates or creatively interacts in a new nonlinear, unpredictable way (the Eureka moment) and where the new organization may be sustained through feedback and the continuous input of energy.*

*In this process quality emerges spontaneously as self-organisation, meaning, value, openness, fractal patterns, attractor formations and (often) increasing complexity (a greater degree of freedom)”.*

Jencks descreve conceitos físicos e matemáticos da complexidade, entusiasmado com o potencial dessa teoria para arquitetura. Contudo, isto nem sempre fica claro nos projetos de arquitetura por ele apresentados.

Ostwald (2009:62) identifica a fonte que tem causado a confusão desses termos: “[t]he problem of terminology is at the root of a number of early misguided projects in the arts and architecture that attempted to use chaos theory as a way of justifying the creation of, in Mandelbrot’s words, ‘true geometric chaos’”. Os arquitetos pós-modernistas usaram oportunamente estes termos para justificar obras complexas do ponto de vista da quantidade de informação visual. Portanto, ainda há a necessidade de esclarecer estes conceitos para os arquitetos, especialmente métodos de abordagem da complexidade.

### **O que é complexidade?**

Os fenômenos complexos ou caóticos geralmente são descritos por poucas variáveis que provocam grandes variações. A teoria do Caos está preocupada em encontrar a ordem intrínseca, ou seja, padrões frequentemente encontrados na natureza. Na arquitetura o caos está associado à falta de padrões ou regras (*IBID.*), contudo Batty e Longley (1994) explicam como a Complexidade foi incorporada por arquitetos e urbanistas que compreendem sua ordem subjacente.

No campo da física e da matemática alguns pesquisadores compuseram teorias fundamentais sobre a Complexidade. Edward Lorenz (1996) idealizou a expressão “efeito borboleta” ao estudar manifestações meteorológicas. O título de uma palestra de Lorenz (1972) foi o que gerou essa expressão: “*Does the flap of a butterfly’s wings in Brazil set off a tornado in Texas?*”. Ou seja, uma pequena alteração em um sistema dinâmico produz estados subsequentes muito diferentes e imprevisíveis. Já Edgar Morin (1991) voltou suas pesquisas para a teoria do Caos<sup>3</sup>, buscando encontrar a ordem em sistemas dinâmicos aleatórios. Para ele um sistema auto-organizador combina uma quantidade de informação incalculável, por isso é um tema desafiador à mente humana.

Fritjof Capra explica, em seu livro *A teia da vida* (1996), a matemática da complexidade e como os ecossistemas são estruturas altamente conectadas, buscando valores como a visão holística. O autor defende a ascensão do pensamento sistêmico: da parte para o todo. Indica também o pensamento integrativo que se caracteriza por ser mais intuitivo, sintético, holístico e não linear, conceitos presentes na teoria da Complexidade, ver **Tabela 1**. Um sistema é complexo se seu comportamento global emerge da interação local do comportamento de seus componentes. Exemplos de sistemas complexos são a reprodução celular, o cérebro e as redes neurais, as colônias de formigas, os enxames de abelhas, as cidades, a economia global e a internet.

**Tabela 1.** Diferenças entre o pensamento contemporâneo.

<b>Pensamento</b>	
<b>Auto-afirmativo</b>	<b>Integrativo</b>
racional	intuitivo
análise	síntese
reducionista	holístico
linear	não linear

Fonte: Adaptado de Capra, 1996.

A tabela comparativa de Eglash (s.d.) (**Tabela 2**) mostra a diferença entre a teoria dos sistemas Lineares e a teoria da Complexidade, elencando os fractais como sistemas auto-organizadores. Os sistemas complexos da natureza se aproximam da ciência dos fractais por suas características como a irregularidade dos limites, a realimentação e a repetição, a não linearidade e a conectividade. Outro conceito da complexidade é a recursão dos sistemas que leva a um comportamento iterativo. Mainzer (2008:90,91) afirma:

<sup>3</sup>A teoria do Caos é estudada por muitos cientistas (matemáticos e físicos), os estudos iniciais foram de Henri Poincaré em 1880, mas só foi formalizada como teoria depois da metade do séc. XX. Atualmente envolve muitas disciplinas matemática, topologia, física, ciências sociais, biologia, astrofísica, meteorologia, teoria da informação, etc.

*“Complex systems consist of numerous interacting elements [...]. Complex systems such as the climate, economic systems, organisms, populations, markets, or communication networks cannot be guided like mechanical devices. But they do obey to nonlinear laws of self-organization [...]”.*

**Tabela 2.** Comparação entre sistemas lineares e não lineares.

<b>Teoria dos Sistemas Lineares</b>	<b>Teoria da Complexidade</b>
<b>Geometria Euclidiana</b>	<b>Geometria Fractal</b>
Dinâmica <b>Linear</b> : um comportamento imprevisível surge apenas de eventos aleatórios (sistema de alta dimensão).	Dinâmica <b>Não linear</b> : comportamento imprevisível pode resultar de interações determinísticas internas de sistemas de baixa dimensão.
<b>Estatístico</b> : sistemas de alta dimensão podem ser caracterizados por uma média, por exemplo, temperatura.	<b>Auto-organização</b> : sistemas de alta dimensão podem ter fenômenos emergentes, por exemplo, estruturas fractais, comportamentos adaptativos e evolução.

Fonte: Adaptado de Eglash, s.d.

Em resumo, a teoria da Complexidade é a ciência que estuda os fenômenos de sistemas dinâmicos não lineares, em seus aspectos físicos, biológicos ou matemáticos, como, por exemplo, tempestades ou furacões, campos magnéticos, crescimento de população, previsão climática e órbita de planetas. Esses fenômenos naturais por muito tempo não foram efetivamente descritos, muitos deles eram até desconsiderados. A Complexidade permite distinguir ordem e padrões onde supostamente havia aleatoriedade, irregularidade, caos. Esta teoria ainda se mantém como um paradigma vigente, mesmo tendo sido “usada, abusada ou ignorada” por arquitetos como descreve Ostwald (2009).

### **Complexidade na Arquitetura.**

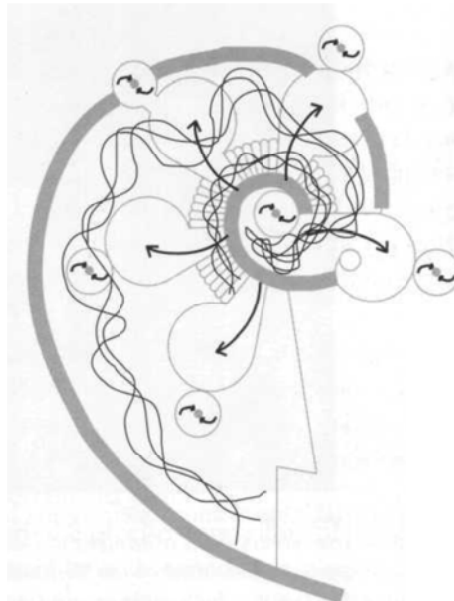
Um conceito principal da teoria da Complexidade é que partes formam o todo a partir de regras simples, alterações no estado inicial provocam resultados imprevisíveis. Sistemas complexos geralmente apresentam comportamentos emergentes e formas emergentes auto-organizadas, o que atrai a atenção dos arquitetos. Os arquitetos têm buscado esse conceito porque ele difere do sistema Euclidiano, tradicionalmente adotado pela Arquitetura, e/ou por sua capacidade de simular a natureza (IBID.). Bovill (2000) explica “[f]rom Charles Jencks in England to Itsuko Hasegawa in Japan, there is discussion in the architectural press of chaos, fractals, complexity theory, and self-organization”. Para uma compreensão mais ampla deste tema é preciso entender que a auto-organização e o caos ordenado pautam a discussão em muitas áreas do conhecimento.

Jencks (2002:210) afirma:

*“the life sciences and system hypothesis had led theorists such as Jane Jacobs and Robert Ventury to privilege complexity twenty years before Complexity Theory caught on as the unifying idea behind contemporary Science, in the mid 1980s”.*

Os fractais começaram a ser utilizados na arquitetura nos anos 80, quando se estreitam as ligações entre as ciências e os estudos da complexidade. Jencks (*ibid.*), ao observar o direcionamento científico para esse pensamento, esclarece que “arquitetura fractal” faz parte da Teoria da Complexidade: “[h]ence the title of this chapter, and the following one on fractals, one of the key sciences of complexity that has emerged to explain the geometry of nature”. Um exemplo de complexidade na arquitetura segundo Jencks (*ibid.*) é a casa Bavinger projetada pelo arquiteto Bruce Goff (Figura 5), cuja estrutura em espiral busca uma dinâmica nos usos.

**Figura 5.** Casa Bavinger.



Planta em composição espiral e um atrator. Fonte: Jencks, 1997.

O livro de Jencks, *The architecture of jumping universe* (1997a), mostra que os arquitetos aproximam seus projetos da teoria da Complexidade para: projetar próximo à natureza com linguagem orgânica, com curvas e dobras, ondas e fractais, usar a autossimilaridade em vez da repetição exata, promover variedade e diversidade, compreender as novas formas de organização do processo criativo (situado entre a ordem e o caos), e entender os processos naturais não lineares e o conceito de realimentação. Nesse livro Jencks trata da complexidade de uma forma única. Para ele existem duas teorias da Complexidade, a científica e a arquitetônica, que, apesar de terem surgido na mesma época, carregam

significados diferentes. Além da crítica à sociedade moderna e à arquitetura modernista, Jencks enfatiza a GF, a não linearidade e a complexidade como o coração do movimento Pós-moderno.

Nas últimas quatro décadas a teoria da Complexidade tem sido aplicada em diversas áreas. Herr (2002:16.1) afirma que para os arquitetos “[...] *the advent of this new science offers the challenge as well as the chance to reconsider common design approaches and to invent new strategies based on the new paradigms*”. A atividade de projeto é por si só complicada; lidar com questões sociais, ambientais, culturais e físicas requer um conhecimento amplo do arquiteto. A teoria da complexidade possui ferramentas para abordar esses problemas, por exemplo, a emergência das formas.

Meredith (2008:43) afirma: “[c]omplexity is achieved by recursive repetition of a simple rule from which stems the structure’s geometry and detail”. Ou seja, uma regra simples é capaz de gerar formas complexas por meio de um processo recursivo; esse padrão complexo tem uma ordem que o organiza. Herr (2002:16.1) explica essa relação: “[c]omplexity theory focuses on complex relationships of elements, which are not random but subject to mechanisms that generate order on various levels of organization”. Essa abordagem do projeto utiliza SGs que trazem consigo uma nova estética com o objetivo de responder com qualidade às questões sociais e tecnológicas.

Diante das possíveis e inúmeras abordagens da complexidade em arquitetura, esta tese procura investigar potencialidades generativas dos fractais. Para tanto adota uma linha de pensamento semelhante à descrição de Bosia (2011:61) que discorre sobre a nova visão dos arquitetos envolvidos com complexidade:

*“[f]rom the origins of mankind, through civilisations, we have learned to recognise patterns in nature, their rhythms and hierarchies. [...] We have learned to appreciate the non-linearity of nature’s systems, based on recursion, cumulative processes of growth, evolution and feedback. [...] The power of computers has enabled us to articulate new organisations and configurations of space based on simple rules, properties and proportional relationships where complexity is generated by the recursive repetition of simple processes”.*

No movimento modernista muitas vezes uma visão reducionista do mundo se mostrou presente. Isto levou a uma argumentação central do pós-modernismo que é a rejeição do desejo simplificador do modernismo. O pós-modernismo permitiu perceber com mais sensibilidade a complexidade do mundo, contudo, Heylighen, Cilliers e Gershenson (2007), explicam que os arquitetos pós-modernos não fazem o uso da teoria da complexidade como deveriam. Para Heylighen, Cilliers e Gershenson (*ibid.*), a maneira como a complexidade tem

sido usada nas ciências sociais não tem produzido resultados produtivos: “[t]he “postmodern” approach, especially one informed by recent developments in general complexity theory, could be extremely useful in enriching the discourse on social and cultural complexity”. Então é importante considerar e testar maneiras de adotar a complexidade no projeto.

### **Como empregar a complexidade?**

Para Kolarevic e Klinger (2008:6), a fabricação de complexidade ressurgiu em um momento tecnológico propício, no qual os equipamentos de produção são fundamentais: “[o]ver the past decade we have seen in architecture the (re)emergence of complexity shaped forms and intricately articulated surfaces, enclosures, and structures, whose design and production were fundamentally enabled by the capacity of digital technologies [...]”. Essa potencialidade da indústria na produção de arquitetura conecta a complexidade de formas com custos menores e uma nova visão estética.

Burly e Burly (2010) identificam como os arquitetos contemporâneos abordam a complexidade nos projetos em termos estéticos. Para a criação e reconhecimento de padrões, nos materiais, e procurando eficiência e economia, os autores concluem que a emergência de formas e a otimização podem ser conceitos próximos. Adotar a complexidade em projeto de arquitetura tem se tornado uma alternativa facilitada pelos avanços nos programas computacionais, na engenharia e na fabricação. Além disso, no âmbito cultural percebe-se que, “[e]mbracing complexity in design is one of the critical issues and challenges of the 21st century” (JOHNSON, ZAMENOPOULOS, ALEXIOU, 2005:3).

A teoria da Complexidade ajuda a preencher a arquitetura de significado e também promover uma visão holística, além de propor um novo desafio aos arquitetos que trabalham com esses conceitos. Para Zamenopoulos e Alexiou (2005:96, grifo nosso), a complexidade tem sido percebida de quatro maneiras no projeto:

*“1) as a **problem** encountered in practicing design or understanding and representing design processes and products; 2) as a **characteristic** attribute of design systems and artifacts; 3) as a **methodology** and tool for designing; and 4) as a **theory** for understanding and defining design”.*

Algoritmos evolucionários, autômatos celulares e fractais, por exemplo, são métodos que têm sido usados para gerar soluções de projeto. Contudo, Ostwald (2009:74) explica “the architectural tradition of complexity differs from the scientific”. Os arquitetos fazem uma interpretação de termos provenientes da ciência para a arquitetura, como coloca Ostwald (*ibid.*:83): “architecture complexity and scientific complexity are not the same thing.

*In most cases the two concepts possess little in common*". Os arquitetos têm interpretado essa teoria de muitas maneiras, e uma contribuição relevante é a da GF. Os conceitos de complexidade e de fractais são complementares, no caso dos fractais a criação de formas é direta, facilitando a compreensão por parte dos arquitetos<sup>4</sup>.

Uma abordagem direta da complexidade é trabalhar com sistemas não lineares, como fractais, no desenvolvimento do projeto. Com a disponibilidade de programas para o projeto e equipamentos para a fabricação, os limites para as formas complexas começam a se desfazer. Enquanto que em períodos anteriores da história da arquitetura dependiam fortemente da mão de obra para execução, o que consumia tempo e dinheiro, hoje a revolução digital tem invertido essa questão.

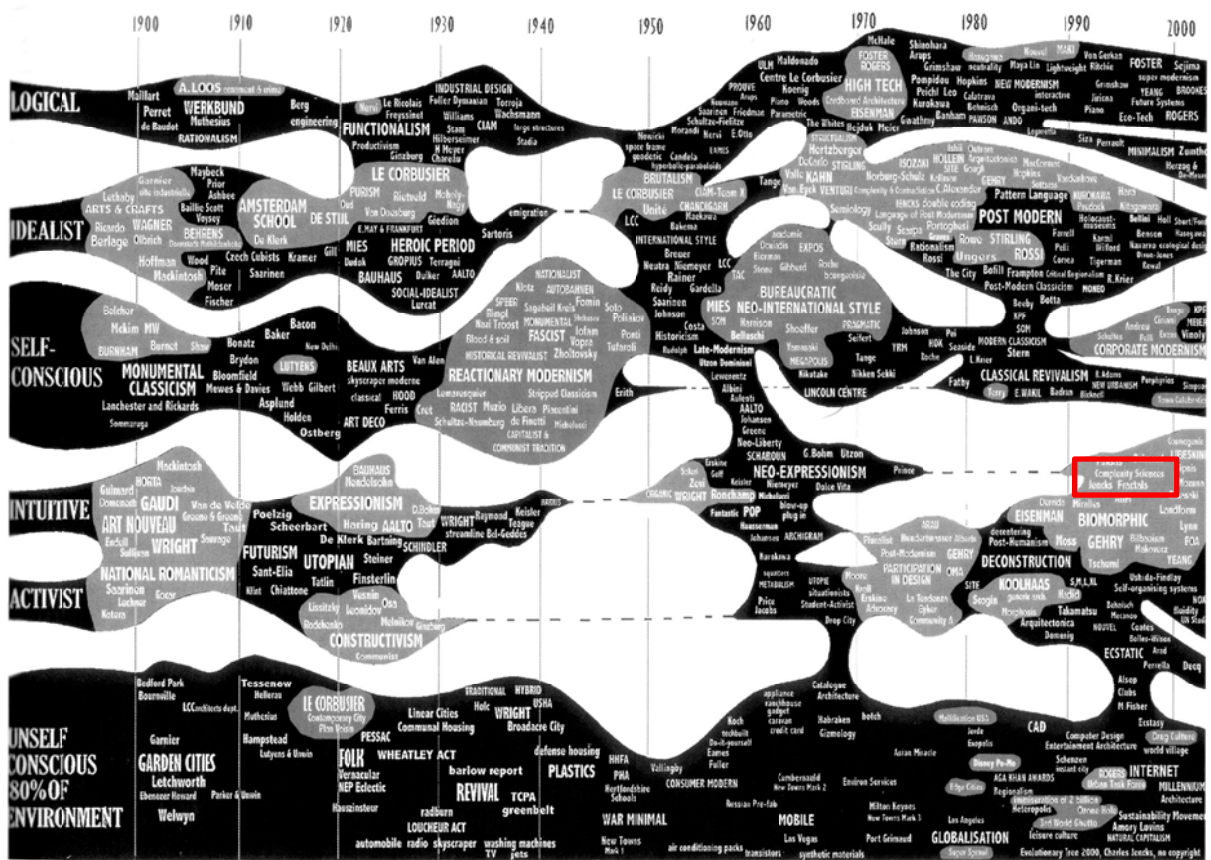
---

<sup>4</sup>Para uma visão mais ampla da tradição da complexidade em arquitetura ver o capítulo 3 de Ostwald (2009), no qual o autor descreve as **prováveis** conexões entre arquitetura e complexidade, **possíveis** conexões e conexões **impossíveis**, visto que o discurso arquitetônico tende a ser muitas vezes abstrato.

## 2.1 Evolução dos movimentos em arquitetura

Nesta seção procura-se compreender como se originou o momento atual da arquitetura contemporânea, especificamente trilhando o caminho da Complexidade. O célebre quadro de evolução da arquitetura elaborado por Jencks, ajuda a entender os movimentos arquitetônicos e sofreu algumas atualizações ao longo dos anos. Na versão mostrada na **Figura 6**, o que Jencks chama de “arquitetura fractal” aparece como uma linguagem intuitiva que surge a partir dos anos 90. Em destaque estão os termos *Complexity Theory* e *Fractals*. Em outra versão desse quadro, versão do livro *O novo paradigma da arquitetura*, a “arquitetura fractal” aparece como uma linguagem metafórica ou metafísica situada entre os anos de 1995 e 2000 em destaque vermelho *Fractal Architecture* (**Figura 7**). A arquitetura com características fractais está muito relacionada com a compreensão e a construção de padrões complexos. No capítulo 4 se explica como isso ocorre.

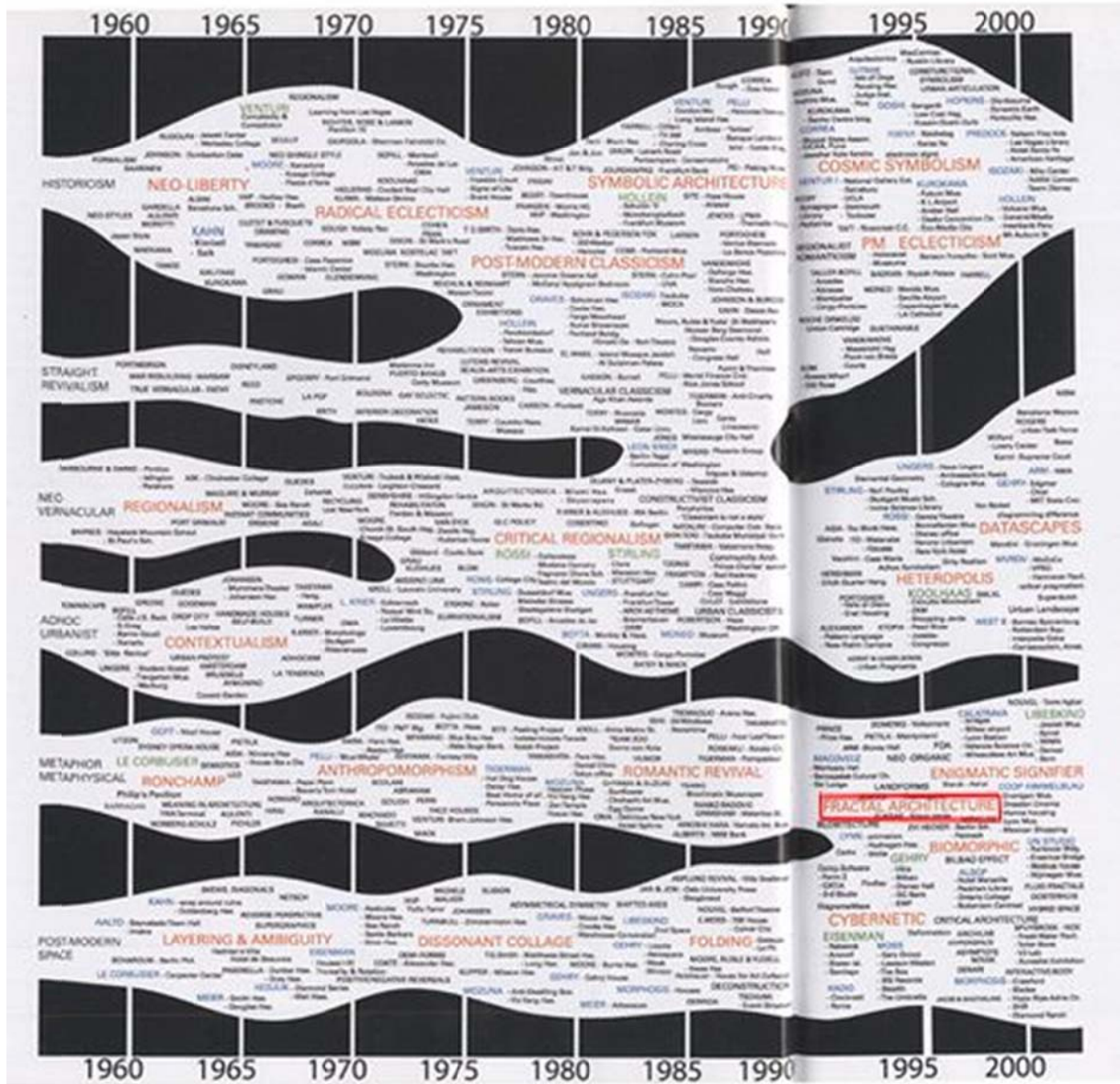
**Figura 6.** Jencks' Theory of Evolution in Architecture



Fonte: Jencks, 2011.



Figura 7. Post-modern evolutionary tree.



Fonte: Jencks, 2002.

Além do diagrama de evolução da arquitetura construído por Jencks, outros fatores ajudam a compreender o panorama arquitetônico nas últimas décadas. As influências tecnológicas e culturais de cada período influenciam a produção arquitetônica e a maneira de se produzir arquitetura. Ao longo do século XX a preocupação com a complexidade esteve presente em diversos momentos, sendo mais visível em certas vanguardas específicas, como o desconstrutivismo e o novo estruturalismo. A seguir são descritos paradigmas arquitetônicos das últimas décadas, que ajudam a compreender a evolução do pensamento contemporâneo.

### **Modernismo.**

Após a segunda guerra mundial, a necessidade de reconstruir as cidades e as tecnologias para construção disponíveis possibilitaram aos arquitetos explorarem novos conceitos (como modulação e standardização) e materiais com desempenho diferente (como o concreto, o aço e o vidro). Na vanguarda modernista a indústria permitira a produção de formas padronizadas, o que de certo modo refletia uma sociedade onde a disciplina e a conduta eram também normatizadas e padronizadas (LIPOVETSKY, 2004).

Essa transição para o modernismo é não somente cultural, mas também econômica. A repetição de elementos facilitando a industrialização e agilizando o processo construtivo foi uma resposta aos recursos escassos e a necessidade de construir mais. As formas idênticas eram mais fáceis de serem reproduzidas na indústria e, portanto mais baratas. As formas geométricas puras sem ornamentação são as características desse período com tipologias muito específicas: *highrise buildings* (torres), *pilotis* (térreo livre) e *siedlung* (edifícios em lâminas). A volumetria do edifício agora é “*a mechanical device that can be operated in order to regulate or control exchanges between interior and exterior [...]. Envelope is no longer part of the structure, made to exhibit autonomous logic and aesthetic*” (LEE, HOLZHEU, 2011). Esta lógica se altera no pós-modernismo, com a pele do edifício novamente exibindo ornamentação.

Durante o modernismo as inúmeras conquistas da ciência apontavam para o que poderia ser um “progresso ilimitado” o que levou a sociedade a manter um **olhar no futuro**, com perspectivas futuristas e positivistas. Contudo, os fenômenos eram analisados em partes, como um mecanismo que pode ser montado, as cidades eram subdivididas em partes, os edifícios eram entendidos como máquinas (Ex.: máquina de morar de Le Corbusier), uma sociedade mecanicista. Em 1896, Louis Sullivan escreveu a frase “*form follows function*” que por muito tempo se tornou um lema arquitetônico modernista. A função muito mais importante para o desempenho do edifício, como uma máquina. O fim da arquitetura Modernista seria anunciado com a demolição do conjunto habitacional Pruitt-Igoe em 1972. “*Felizmente, podemos datar a morte da arquitetura moderna em um momento preciso do tempo*” (JENCKS, 1977).

### **Pós-modernismo.**

A partir da década de 70 surge a vanguarda pós-modernista, como uma reação ao período anterior. Interessantemente inicia como um movimento de arquitetura, “[a] partir do final dos anos 70, a noção de pós-modernidade fez sua entrada no palco intelectual [...]

*Tendo surgido inicialmente no discurso arquitetônico (em reação ao estilo internacional) [...]” afirma Lipovestky (2004).*

Os arquitetos pós-modernos usavam elementos que reforçavam a contradição: metáfora, colagem e simbolismo (KIPNIS, 1993). As formas eram organizadas em composições elaboradas e fragmentadas. Os elementos arquitetônicos não necessariamente correspondiam à sua função original, por exemplo, o Security Marine Bank Wisconsin (Figura 8), no qual a adaptação da fachada romana pretende criar uma imagem de solidez. É o que sinalizam Venturi, Izenour e Brown (1972) em *Aprendendo com Las Vegas*, o poder da forma em provocar sensações, ou *“the building envelope is made to communicate ideas”* com explicam Lee e Holzheu (2011).

Figura 8. Security Marine Bank Wisconsin.



Fonte: Jencks, 2002.

Nesse período surgem preocupações com a personalização, o desejo individual. A sociedade se organiza de forma diferente, sem regras, mas com escolhas e desejos (de consumo). Nota-se um **olhar para o passado** (*revival*), e perda da fé no futuro utópico modernista. O uso da decoração nos edifícios é reforçado e expressa condições estéticas e *status* financeiro. A Teoria da Complexidade começa a ser aplicada em diversas áreas do conhecimento, incluindo a arquitetura. *“Form follows anything”* disse Michael Sorkin em 1991 (OSTWALD, 2001). Os fractais aparecem no Pós-modernismo ainda de maneira bastante conceitual, como no projeto *House 11a* de Eisenman.

Kirby (2009) explica no capítulo inicial do seu livro o que é o pós-modernismo e tenta detectar na arte (filmes, literatura, cultura) indícios do fim do pós-modernismo. Ele afirma que apesar de, nos últimos anos, não ter surgido nenhuma obra pós-modernista de qualidade, ainda assim, há produção pós-moderna. Não há como garantir que nos próximos anos não apareça algo pós-moderno que seja comparável às obras do seu tempo áureo (anos 90), contudo Kirby acredita que seja pouco provável. Apesar das tentativas de encerrar o pós-modernismo, Kirby (*ibid.*:49) conclui: *“the proposition “postmodernism is dead” cannot be*

*proven* [...]”. A tentativa de demolição de ícones da arquitetura pós-moderna tem se tornado notícia, por exemplo, rumores de demolição do prédio Capsule Tower de Kisho Kurokawa e do prédio Portland Building de Michael Graves. Seria um reflexo de que esses edifícios não correspondem mais aos desejos da sociedade?

### **Desconstrutivismo**

Em seguida emerge uma das vanguardas mais controversas em termos de complexidade na arquitetura, o Desconstrutivismo. Trata-se de um movimento que preconizava as relações espaciais irregulares: colisão, quebra, ângulos. O conflito gerado era reflexo, dentre outras coisas, da interpretação da teoria do Caos. Os arquitetos desconstrutivistas valorizam a irregularidade inerente aos sistemas naturais por saberem que eles possuem uma ordem intrínseca, ou apenas para contrapor a geometria Euclidiana. Segundo Lynn (2013:33) “[o] *desconstrutivismo teorizava o mundo como um lugar de diferenças para que a arquitetura pudesse representar formalmente tais contradições*”.

O movimento desconstrutivista se baseia em diversos conceitos como os da filosofia de Jacques Derrida, que inclusive elaborou em projetos com Peter Eisenman, e ajudou na conexão da arquitetura com a teoria do Caos (SALINGAROS, 2008). O método desconstrutivista de Derrida é muito similar às técnicas matemáticas da Teoria do Caos. Uma dessas técnicas é a colagem. Apesar de não ser possível afirmar com precisão a conexão direta entre Derrida e a teoria do Caos (HAYLES, 1990), os conceitos utilizados por ele são paralelos a essa ciência. Hayles (1991) afirma:

*“[a]nother convergence is the emphasis on iterative techniques and recursive looping. In deconstruction, as in the science of chaos, iteration and recursion are seen as ways to destabilize systems and make them yield unexpected conclusions”.*

Como no Pós-modernismo a ligação com os fractais (iteratividade, recursividade) aparece novamente, porém de maneira menos abstrata, como, por exemplo, no projeto de Daniel Libeskind para a extensão do museu Victoria e Albert que cria um revestimento que ele chama de fractile (ver seção 4.2.1).

Bernard Tschumi se refere ao desconstrutivismo por “*form follows fantasy*” ou “*form follows fiction*” ao comentar sobre a exposição Desconstrutivismo e Arquitetura organizada por Philip Johnson no Museu de Arte Moderna de Nova Iorque – MOMA (JOHNSON, WIGLEY, 1988). Posteriormente Jencks (1995) faz uma aproximação entre arquitetura e ciência enfatizando a teoria do Caos como ideia por trás do desconstrutivismo.

### **Hipermodernismo / Digimodernismo?**

Nos dias de hoje não há um consenso na denominação de vanguardas arquitetônicas ou termos para determinar esse período. Talvez porque a multiplicidade e diversidade sejam aceitas com naturalidade ou porque ainda não há distanciamento histórico suficiente. Contudo alguns padrões podem ser identificados, por exemplo, a continuidade espacial é um dos conceitos valorizados em termos de composição arquitetônica. Lynn e Deleuze (2004) chamam de **Fold** a arquitetura que opta pela continuidade espacial em vez da irregularidade.

Oxman e Oxman (2010) designam de **New Structuralism** o atual momento no qual a arquitetura surge a partir de processos digitais de avaliação dos materiais e do estudo de estruturas naturais. No novo estruturalismo a definição do projeto começa pelo estudo do material e da estrutura, no qual a forma é resultado dessa interação. Para tanto são utilizados programas computacionais de simulação e análises *“to optimize the performance of buildings. [...] Emergent and/or generative systems that respond and adapt to environmental or parametric conditions”* (LEE, HOLZHEU, 2011).

O filósofo Lipovetsky (2004) acredita que o termo **Hipermodernismo** reflete a cultura contemporânea na qual a sociedade liberal é caracterizada pelo movimento, fluidez e flexibilidade. Existe agora uma ideia de responsabilidade individual. O pensamento é integrado, considera tanto as partes como o todo, ou seja, conectado com a teoria da Complexidade. Projeto, construção e fabricação são computadorizados. Para Kirby (2009), **Digimodernismo** é um termo que explica melhor a interação do ser humano com o computador em uma sociedade onde a noção de tempo e espaço se redefine, o **olhar está no presente**. Lemas que definem este momento são *“form follows performance”* (KOLAREVIC, KLINGER, 2008; HENSEL, SUNGUROGLU, MENGES, 2008) e *“form follows force”* (OXMAN, OXMAN, 2010).

Nas artes identifica-se o movimento chamado de hiper-realismo, que teve seus primeiros passos no início dos anos 70, no qual os artistas usam técnicas digitais e artesanais para representar a realidade da maneira realista e precisa. Alguns artistas do hiper-realismo contemporâneo são os pintores: Jacques Bodin, Juan Francisco Casas, Eloy Morales, Terry Rodgers, Teresa Eliott, Roberto Bernardi, Jason de Graaf, Robin Eley, Pedro Campos e Steve Mills; os escultores: Ron Mueck, Sam Jinks, Patricia Piccinini, John de Andrea e Duane Hanson. Frequentemente as obras criticam ou fazem uma reflexão sobre os hábitos e o modo de vida hipermoderno. Outros exemplos de hiper-realidade são os filmes: 300, Matrix e Sin City; o programa: Big Brother; os jogos: Second Life, The Sims e Sim City; nestes a realidade



é apresentada de maneira incerta em um espaço-tempo contínuo e infinito, mas de certa maneira palpável.

Na arte o hiper-realismo provoca no expectador uma incerteza do real, um desejo de ver e descobrir a pintura, de tocar a escultura, de vivenciar o jogo. Como se expressa o hiper-realismo na arquitetura? Na arquitetura provoca os mesmos desejos de ver, tocar, vivenciar. Segundo Flusser (2007) para o novo ser humano,

*“a vida deixou de ser um drama e passou a ser um espetáculo. Não se trata mais de ações e sim sensações. O novo homem não quer ter ou fazer, ele quer vivenciar. Ele deseja experimentar, conhecer e, sobretudo, desfrutar”.*

Nas últimas décadas as concepções arquitetônicas têm surgido com uma estética no qual o ornamento resulta dos processos de projeto e fabricação (PICON, 2013b). Esse novo ornamento manifesta uma apreciação diferente por parte das pessoas (Figura 9), apreciação pelo toque, contato. O ornamento contemporâneo também desempenha funções significativas no edifício.

**Figura 9.** *Seed Cathedral.*



Projeto de Thomas Heatherwick, Exposição de Shangai em 2010. Fonte: Hufton and Crow, 2010.

Hipermodernismo e Digimodernismo são conceitos recentes e ainda estão em debate. Contudo, ambos os conceitos apresentam uma análise da sociedade contemporânea, seus modos, problemáticas e dilemas. Enquanto Lipovestky (2004) analisa de modo geral a evolução do pós-moderno para o hipermoderno, focando nos comportamentos e interações entre os seres humanos, Kirby (2009), mostra de maneira detalhada como as novas tecnologias tem reconfigurado a cultura formando uma nova sociedade.

Kirby (*ibid.*:231) identifica características de uma sociedade se tornando autista em contraponto à sociedade pós-moderna. Por exemplo, superpopulação, vigilância constante, poluição sonora e visual; *versus* a necessidade do autista de se isolar: internet, realidade virtual, jogos de simulação. E também nova estética, como o surgimento da narrativa infinita no cinema, videogames, literatura: Senhor dos Anéis e O Hobbit, Harry Potter e Criaturas

Fantásticas, Star Wars, Piratas do Caribe, Crepúsculo, 50 tons de cinza, Resident Evil, The Sims, são exemplos de narrativas que continuam a se expandir. As implicações de uma arquitetura “digimodernista” não são abordadas por Kirby, mas podem ser medidas pelo impacto das novas tecnologias no projeto e construção no âmbito técnico, pelos novos métodos de fazer e vivenciar a arquitetura, pelo surgimento do novo ornamento no âmbito estético, e pelo projeto com superfícies contínuas e abstratas no âmbito do programa arquitetônico.

## 2.2 Novo Ornamento

*“Ornament organizes detail in a very precise and sophisticated fashion in order to make a larger form more comprehensible”* Nikos Salingaros.

Esta seção trata do novo ornamento na arquitetura contemporânea possibilitado pelos avanços tecnológicos recentes e como essas mudanças têm sido discutidas tecnologicamente (MOUSSAVI, KUBO, 2006; KOLAREVIC, KLINGER, 2008; SCHUMACHER, 2009) e teoricamente (GLEITER, 2009a; PICON, 2013a).

### **O ornamento na cultura humana.**

Em diversos campos de estudo como arqueologia, antropologia, história da arte e ciências sociais, o ornamento é considerado uma das principais formas de manifestação cultural do ser humano. Dollinger (1966:17) afirma:

*“Adornarse es una necesidad ancestral del ser humano, que lo hace conscientemente. En los animales, la Naturaleza cuida de satisfacer esa exigencia. [...] superficies sin función constructiva aparecen cubiertas de ornamentos”.*

Formas específicas e ornamentos cumprem funções distintas na natureza e podem se complementar, cumprindo duas funções, forma mais ornamento. Elencar todos os padrões de ornamentação da natureza criaria um catálogo interessante para arquitetos, porém isso não é viável ou possível. Contudo, Wagensberg (2005) classificou algumas formas de acordo com a sua geometria mais comuns na natureza, por exemplo, a esfera que protege, o hexágono que pavimenta e os fractais que colonizam. Aqui é interessante antecipar o estudo de Batty e Longley, *Fractal Cities* (1994), no qual explicam como as cidades podem crescer em padrões fractais.

Sobre a questão da ornamentação na arquitetura e a relação com as formas naturais, Frank Lloyd Wright (Dollinger, 1966:19) explica:

*“En la arquitectura de la especie humana la ornamentación es tan natural como el carapazón en la especie tortuga, lógica como el plumaje en los pájaros, natural como la forma de ciertas conchas marinas, conveniente como las escamas del pez, las hojas de los árboles o las flores de una planta en crecimiento.”.*

Wright, comparando a arquitetura com a natureza, acredita que o ornamento assume uma função lógica, ou seja, cumpre funções que vão além das decorativas. Schumacher (2009) tem um entendimento do ornamento como padrões: “[p]atterns have been covering architectural surfaces since times immemorial – in the same way as such patterns



*have been spread all over the domain of human artefacts*”. Nas cavernas de Lascaux (**Figura 10**) a arquitetura era o espaço que a natureza oferecia e o ornamento fazia com que aquele espaço tivesse uma sensação de pertencer ao ser humano. As primeiras artes das cavernas representavam formas de vida: ursos, gado, bisões. Ainda não se sabe ao certo se as representações tinham o intuito de dominar os animais através do desenho ou de mostrar a realidade do dia a dia daqueles seres humanos. Sabe-se que em algumas cavernas como Chauvet os desenhos eram elaborados de maneira a aproveitar os relevos das rochas para causar a sensação de movimento e volumetria conforme a projeção da luz (CAVE, 2011).

**Figura 10.** Caverna de Lascaux.



Fonte: Brimberg, s.d.

Dollinger (1966:17) explica “[l]os hombres del período paleolítico desarrollaron ya sistemas ornamentales”. Essa representação visual transmitia, entre outras coisas, a cultura daquela época, a maneira de se expressar, os modos de vida. Assim, cada período histórico possui uma ornamentação específica como se pode ver em Jones (1910), cuja expressividade é o reflexo de um momento cultural. Em seu livro Jones apresenta como a ornamentação evoluiu de um estilo para o outro com inspiração em formas da natureza. Jones (*ibid.*:2) afirma “[...] whenever any style of ornament commands universal admiration, it will always be found to be in accordance with the laws which regulate the distribution of form in nature”.

Jones (*ibid.*) propõe 37 princípios de combinação da forma e cor na arquitetura e artes decorativas, dentre os quais se destaca o princípio número 2:

*“Architecture is the material expression of the wants, the faculties, and the sentiments, of the age in which it is created. Style in Architecture is the peculiar form that expression takes under the influence of climate and materials at command”.*

Não há espaço para discorrer sobre a evolução do ornamento na arquitetura, nem este é o propósito deste trabalho. Esta breve introdução serve para explicar que a

ornamentação é uma manifestação cultural na qual o ser humano pode se perceber como parte de uma sociedade.

### **A rejeição ao ornamento.**

No período Modernista a concepção do ornamento transforma-se. A necessidade de construir com mais rapidez e as possibilidades tecnológicas contribuíram para o discurso moderno do não-detelhe. “*There are no details in modernism*” ou o detalhe como abstração é o que explica Ford (2003) no livro *The Architectural Detail*. O autor afirma que, no modernismo os detalhes não foram completamente eliminados; eles existiam, mas eram idealizados de maneira a se ocultarem, uma vez que o detalhamento era entendido como sinônimo de ornamentação. O material em sua forma natural era o único ornamento aceito no modernismo (KOLAREVIC, KLINGER, 2008).

Um dos maiores críticos à ornamentação foi Adolf Loos, que publicou diversos textos sobre este tema, entre eles “*Ornament and Crime*” em 1908. Loos (2004) utilizou argumentos como a exploração dos artesãos na produção de objetos ornamentados. Para ele o ornamento representava um atraso na cultura e o trabalho do ornamentador não era devidamente pago. O ornamento encarecia o objeto devido às horas de trabalho, mas o objeto ornamentado era desvalorizado rapidamente com o tempo em relação aos objetos lisos.

Loos (*ibid.*) faz uma comparação entre os “selvagens” de Papua que tatuavam o corpo, as embarcações e todos os objetos que possuíam, enquanto que, para o ser humano moderno, a tatuagem estava presente apenas no universo dos criminosos. Considerando o ornamento um retrocesso na evolução, Loos (*ibid.*) afirma “*o homem moderno, o homem com atual autodomínio, não precisa do ornamento – pelo contrário, ele detesta-o*”. Então para Loos, o ornamento estava ligado a seres humanos “menos” evoluídos e ao valor acrescido nos produtos, além da exploração da mão de obra.

Essa crítica de Loos faz sentido em um período em que se os processos industriais estavam surgindo com forte impacto incluindo a construção civil. Acreditava-se que o potencial da industrialização, surgida no séc. XIX, poderia trazer maior crescimento econômico e velocidade na produção. Por exemplo, o automóvel Ford modelo T foi produzido em série no ano de 1908. A industrialização também tem um papel importante na redução do ornamento na arquitetura (LOVERIDGE, STREHLKE, 2006).

Para Loos havia a questão do aceleramento da produção, a indústria austríaca preferia produzir bens duráveis, por exemplo, móveis que duravam 10 anos. As pessoas

substituíam pouco os objetos e a indústria seguia um ritmo lento de produção, contudo ainda compatível com a demanda. Reduzir o tempo de vida útil dos objetos era a alternativa para aquecer a economia. Para Loos, a durabilidade estética dos objetos produzidos era curta e a durabilidade física era longa demais. Loos era aficionado pela economia de tempo e material. O seu pensamento funcionalista é bastante evidente: “[a] obra de arte é eterna, a obra do artesão é efêmera. O efeito da obra de arte é espiritual; o do artigo de utilização diária é material” (LOOS, 2004).

Loveridge e Strehlke (2006:35) afirmam que o principal motivo para o ornamento desaparecer na arquitetura foi a produção industrializada em massa:

*““Ornament and Crime” can certainly be seen as a crucial contribution in the architectural discussion about the exclusion of ornament. This modernist emphasis on unadorned form, combined with the upcoming international style and the replacement of craftsmanship by the rise of mass production yielded a systematic elimination of ornament”.*

O argumento contra a ornamentação permanece enraizado na mente de muitos arquitetos que passaram a adotar essa conduta como uma postura ideológica na arquitetura. Por exemplo, Moussavi e Kubo (2006), ao explicarem o ornamento na arquitetura contemporânea, procuram deixar de lado questões como o significado inerente do ornamento, ao enfatizar as questões tecnológicas e ambientais envolvidas no projeto de arquitetura. Segundo Moussavi e Kubo (*ibid.*), “[h]ence for Loos, ornamentation had lost its social function and had become unnecessary”. Para Schumacker (2009) a condenação do ornamento no modernismo não pode ser considerada somente pela industrialização que substituiu a produção artesanal, pois somente cem anos após a revolução industrial foi que o modernismo de superfícies brancas conseguiu sucesso.

Loos não foi o primeiro arquiteto a questionar o ornamento. Em 1892, Sullivan (1918), publicou um artigo chamado “*Ornament in Architecture*”, no qual questionava o valor estético do ornamento. “[...] ornament is mentally a luxury, not a necessary [...]”. Sullivan (*ibid.*) procurava um meio termo entre a ornamentação e a decoração:

*“I believe, as I have said, that an excellent and beautiful building may be designed that shall bear no ornament whatever; but I believe just as firmly that a decorated structure, harmoniously conceived, well considered, cannot be stripped of its system of ornament without destroying its individuality”.*

Sullivan, assim como Frank Lloyd Wright, queria dizer que o ornamento não deve ser algo adicionado posteriormente para dar significado, mas é a condição da arquitetura. Sullivan percebe que a presença ou ausência do ornamento devem ser determinadas nas fases

iniciais do projeto, ou seja, fazem parte do conceito geral. Ele defendia que a cópia ou a imitação dos períodos anteriores já não satisfazia a cultura, e toca em um ponto importante e de certa maneira muito atual, “[i]t must be manifest that an ornamental design will be more beautiful if it seems a part of the surface or substance that receives it than if it looks “stuck on,” so to speak”” (IBID.).

Ainda sobre o ornamento moderno, Dollinger (1966) questiona se os ornamentos serão desenvolvidos novamente e apesar da dificuldade de fazer um prognóstico ele responde afirmativamente. Sua previsão, aparentemente, foi correta, tendo em vista o que está acontecendo na arquitetura contemporânea: “[c]abe imaginar que los motivos geométricos ganen terreno. La unificación podría ser realizada por la industria, que suministra cada vez más elementos de construcción pré-fabricados” (IBID.).

Sobre a industrialização do ornamento, Loveridge e Strehlke (2006:36) explicam “[d]igitally generated ornament has a somewhat ironic relationship to the concepts of mass customization and CAAM production”. Devido à industrialização ter sido um dos motivos que contribuíram para o desaparecimento do ornamento na arquitetura, “[i]t is therefore paradoxical that a return to ornament may be possible through the use of CAAD/CAAM technology” (IBID.:36). Os sinais de mudança quanto ao ornamento na arquitetura são bem claros, Trilling (2001:6) por outro lado afirma: “[o]rnamnt is becoming acceptable again, but its rehabilitation is far from complete. Ornament should once again speak for itself, as it did universally for thousands of years”.

Outra questão relacionada ao ornamento é o sentimento de prazer provocado pela organização dos elementos. “[t]he compositional message of the Alhambra, surely, is that intricacy is more satisfying if built on order, even simplicity, and that simplicity’s pleasures can comfortably include the dazzlingly intricate”, Moore, Mitchell e Turnbull (1993), mostram a função de estímulo intelectual para as formas complexas, porém ordenadas. Eles usam a palavra intrincado para se referir à formas complexas, mas com a expressão “built on order”, ou seja, é uma complexidade com lógica subjacente que provoca satisfação intelectual.

Venturi, Izenor e Brown 1972 sugeriram a substituição da transparência característica do Modernismo pela ornamentação (*décor*) pós-moderna, o que se tornou rapidamente obsoleto. Também no pós-modernismo as mudanças na arquitetura foram reflexo de novos conceitos culturais e sociais. Este movimento explorou a complexidade das formas, mas com um resgate da decoração da arquitetura de períodos anteriores. A colagem serviu

como instrumento para criar composições arquitetônicas compostas por diversas partes e diferentes ideias. Jencks (2002) também discute conceitos como pastiche e *kitsch* na arquitetura pós-moderna.

Mas o ornamento pós-moderno se limitou a copiar, com pouca evolução tecnológica na produção da arquitetura. Isto se altera radicalmente com a introdução de novas tecnologias nas últimas décadas, que será explicado a seguir.

### **O ornamento digimoderno/hipermoderno**

*“Ornamentation equals architecture”*. John Ruskin

*“Architecture = form + ornament”*. Nikos Salingaros

O ornamento tem retornado à apreciação em arquitetura, apesar da negação do ornamento durante o século XX, como explica Trilling (2001: 185):

*“Throughout most of the twentieth century, Western culture has turned its back on ornament. Not just a particular style but ornament itself has been the object of a taboo [...]. Architecture suffered most severely, but cosmophobia - fear or mistrust of ornament - still pervades the decorative arts [...]”*.

Atualmente a maneira de entender o ornamento na arquitetura está em transformação. Questões sociais, ambientais e tecnológicas contribuem para este novo ornamento. Antoine Picon (2013b) resume esta nova tendência:

*“Once condemned by Modernism and compared to a ‘crime’ by Adolf Loos, ornament has made a spectacular return in contemporary architecture. This is typified by the works of well-known architects such as Herzog & de Meuron, Sauerbruch Hutton, Farshid Moussavi Architecture and OMA. There is no doubt that these new ornamental tendencies are inseparable from innovations in computer technology. The proliferation of developments in design software has enabled architects to experiment afresh with texture, colour, pattern and topology”*.

O ornamento comunica o que há no edifício, de acordo com Salingaros (2007:85) *“[a] form's visual organization communicates information to people through the surfaces and geometry it presents”*. O ornamento contemporâneo possui aspectos estéticos resultantes de processos computacionais e frequentemente desempenha funções no edifício. Para Mitchell (2005) alguns arquitetos simplesmente exploraram a tecnologia digital recente (ver capítulo 5) para reduzir o custo de construção, enquanto outros usaram a produção em massa para “proliferar” o ornamento (anteriormente produzido por artesãos) sem custos adicionais. Mitchell (*ibid.*:42) segue explicando que o diferencial foi que: *“others [architects] have*

*recognized that the digital revolution has opened up new domains of architectural form for exploration, and they seized the opportunity to produce projects that break the old rules”.*

Gleiter (2009a:5) explica que o novo ornamento não seria possível de ser construído sem procedimentos algorítmicos, o que altera tanto o processo de projeto quanto o tipo de arquitetura elaborada:

*“Today the potential for the new ornament and its double ontological definition lies in the “interactive linkage” between design and construction procedures that are no longer determined mechanically but are calculated algorithmically by computer. The digital-constructional and the anthropological sides are thus interlaced via algorithmic, digital conceptualization of the design”.*

Gleiter (2009b) em seguida alinha as novas tecnologias para o projeto com a produção arquitetônica contemporânea:

*“With computational design, mass customisation and scripting software, the ornaments have become separate from paper, walls or electronic screens and now penetrate the material and structure of things. [...] Under the influence of digital processes, material, structure and ornament enter into a new interrelation”.*

Um bom exemplo de como o ornamento vem acompanhado de critérios de projeto é o projeto *Pixel Building* do escritório Studio 505, construído em Melbourne no ano de 2010 (Figura 11). Picon (2013a) afirma “[t]he project is emblematic of the close association between ornament and environment-friendly envelope performativity that characterizes many contemporary design approaches”. O projeto associa a proteção solar e um sistema de recolhimento de água de chuva com a ornamentação da fachada do edifício.

**Figura 11.** Pixel Building em primeiro plano.



Fonte: Do autor, 2015.

Picon (2013a) admite “[c]ontemporary architectural decor differs from what ornament used to mean on a series of key points”. Em períodos prévios o ornamento era concentrado em pontos específicos do edifício, adicionado a partes específicas. Isso criou a ideia de superficialidade, pois poderia ser facilmente removido sem consequências para o funcionamento ou desempenho do edifício. O ornamento contemporâneo, como no prédio Pixel, possui uma função no edifício e sua eliminação traria outras consequências além da estética. Devido ao uso gratuito e exagerado de simbolismo no movimento Pós-moderno, os arquitetos contemporâneos nem sempre tem uma reação positiva ao significado que o ornamento pode transmitir. A dialética que surge pela condenação do ornamento pelo Modernismo e o uso em excesso do ornamento pelo Pós-modernismo tem sido resolvida com uma nova visão da ornamentação na arquitetura.

Moussavi e Kubo (2006) acreditam no ornamento como necessidade: criando efeitos e causando sensações; consistente com a cultura e o local; e por fim como uma expressão cultural. Para os autores os programas arquitetônicos contemporâneos, com espaços flexíveis e fachadas sem aberturas, possibilitam uma maior atenção ao ornamento. Isto tem gerado edifícios, cujos envelopes sem aberturas ou com pouca necessidade de comunicação com o exterior, são ornamentados, por exemplo, a loja John Lewis (Figura 12).

**Figura 12.** John Lewis Store.



Fachada ornamentada da Loja John Lewis do escritório FOA. Fonte: Mishima, 2008.

Picon (2010:138, grifo nosso) resume claramente o passo que foi dado em relação ao que era considerado ornamento no modernismo:

*“Among the consequences of the suspension of traditional tectonic assumptions, one finds a spectacular return of ornament as something distinct from tectonic articulation. Today’s architectural ornament does not have much in common with the concept that prevailed before*



*the dawn of modernity, a concept that presented sculptural and above all symbolic dimensions. In conjunction with the **new importance of surface**, the ornament today generally conceived as an integral part of a pervasive condition that brings it **closer to a pattern** than to a sculpt decoration”.*

O ornamento pode servir como meio de comunicação entre o edifício e a sociedade. Moussavi e Kubo (2006) acreditam que o ressurgimento do ornamento está relacionado com a função que assume no edifício: controle de iluminação, montagem de paredes, estruturas que servem de base para a geração de padrões. Levit (2008), tem outro ponto de vista, “[n]ow rooted in function, questions of purely symbolic or formal motivation can be put aside”, enquanto que Moussavi e Kubo acreditam que seja possível ignorar as questões simbólicas do ornamento quando assume uma nova função no edifício.

Levit afirma que o ornamento não pode ser reduzido a uma questão funcional; o ornamento continuará a trazer consigo uma carga de simbolismo. Moussavi e Kubo tentam remover ou diminuir o simbolismo do ornamento em seu discurso. Da mesma maneira Meredith (2008:6) explica “[d]espite the contemporary collective desire to forget postmodern semiotic signification, everything visual eventually devolves into symbolic imagery”. O ornamento pode assumir diferentes qualidades na arquitetura: como solução para o sistema construtivo, detalhes independentes ou detalhes ocultos como explica Ford (2003), ainda assim expressa alguma qualidade simbólica.

Ford (*ibid.*:56) explica: “[t]he consistent detail can be a motif, paradigm, symbol or ornament”. O que leva a Gleiter (2009b) que defende três teses para o ornamento contemporâneo:

1. O ornamento não tem somente um lado tecnológico, mas um lado antropológico muito grande. E levanta algumas questões:

*“What is new about the new ornament? What does it change in the relationship between human beings and environment? How does it affect how we feel and our relationship with things? [...] How does the new ornament differ from machine ornament and classical ornament, and where in turn do affinities and continuities exist?”.*

2. A recorrência do questionamento do ornamento na história sempre é uma indicação de uma mudança fundamental na cultura.

3. “Ornament [...] is where the reconceptualization of culture in the ever-changing cultural force field takes place”. É um ponto final ou um ponto de mudança, seria o fim do paradigma Albertiano que indicava a separação do processo intelectual de projeto da



realização direta do artesão. Segundo Gleiter (*ibid.*) e Carpo (2011) as ferramentas digitais tendem a abolir essa separação.

Os arquitetos do Lab Architecture Studio (s.d.) ao pensarem o projeto Federation Square em Melbourne afirmam: “[i]ndustrialization no longer equates to standardisation, but instead allows for unique differentiation through material variety and surface figuration”. Kolarevic e Klinger (2008:12) também acreditam que a maneira de usar o material é uma das características da arquitetura contemporânea:

*“[...] in contemporary architecture, materials and their inherent properties are often fundamental points of departure for discovering and exploring new spatial possibilities (effects) and for designing different perceptions and experiences of architecture (affects)”.*

Neste sentido Gleiter (2009a) conclui:

*“Ornament is practically the intersection or interface between the technical and constructional processes that the material requires and the manual and creative processing through the craftsman or producer. [...] In the ornament both the material-constructional and the anthropological aspects become one as visible presence”.*

Recentemente os arquitetos contemporâneos perceberam que a informação digital pode ser utilizada em fabricação e construção com o envio de arquivos de corte para uma máquina CNC. O projeto e a manufatura de edifícios complexos podem ser vistos em Kolarevic (2003). Com a fabricação digital é possível construir maior complexidade de formas, como explica Craig Schwitter (KOLAREVIC, KLINGER, 2008): “[...] architectural solutions become increasingly complex, in part due to the power of expanding arsenals of architectural software and the intense spread of architectural information and construction technologies on an international basis [...]”.

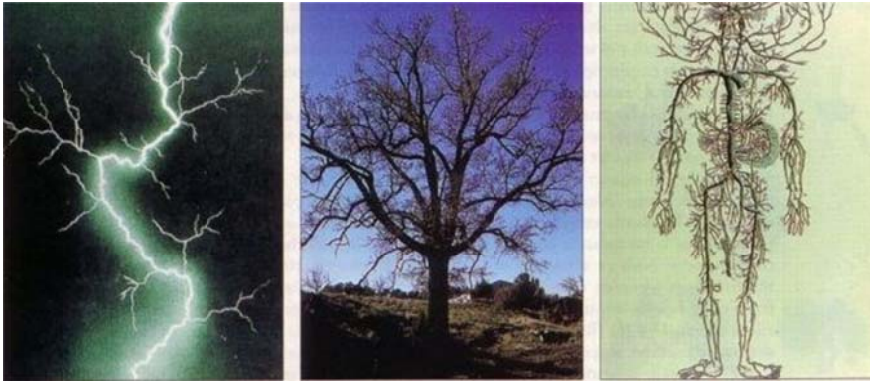
Kajima e Panagiotis (MEREDITH, 2008:130) completam: “[i]n recent years is an increasing trend in architecture to exploit the ability of algorithmic design to produce complex forms by implementing relatively simple and easy formulas”. A ornamentação pode surgir de padrões geométricos e funções matemáticas como explicam Kolarevic e Klinger (2008). Para Meredith (2008:43) “[...] complexity generates pattern and ornament, tectonic in its nature and therefore indiscernible from the structure”. Salingaros (2010:62) discursa em favor do design fractal e do ornamento: “ornament is necessary for coherence” e “lack of ornament is unnatural!” são algumas das frases que o autor utiliza. Para ele a falta de ornamento viola a distribuição universal que é necessária para a estabilidade matemática. Neste sentido, escalas intermediárias são tectônicas e escalas menores são ornamentais.

Na arquitetura contemporânea o ornamento cumpre uma função importante no edifício, relacionada principalmente aos aspectos ambientais, construída sob a influência de sistemas paramétricos e da manufatura digital. Observa-se, de acordo com Gavra (2013), “*convergence towards parametric, omnipotent ornament that, implemented through patterns, can be perceived semi-consciously*”. Contudo, percebe-se que os significados próprios da ornamentação ainda estão em descoberta na arquitetura contemporânea. Trilling (2001:64) precisamente conclui:

*“[t]he ornament most likely to meet with favor and re-acceptance today is ornament applied with a clear sense of the integrity - and primacy - of functional form. Nevertheless neither the intrinsic beauty of ornament nor the privileging of functional form will guarantee success if the two are out of balance”.*

Harris (2012:287) explica sobre o ornamento e os fractais:

*“The development of ornament according to fractal geometry creates a composition that possesses the same strong perceptual qualities as other fractal forms. It can be utilized within the composition to provide a perceptual highlight of fractal form that resonates with humans”.*

**Figura 13.** Formas fractais encontradas na natureza.

Fonte: Wagensberg, 2005.

### 3 Geometria Fractal

*“Assim que percebermos que somos conectados a estruturas fractais, iremos apreciar mais uma árvore do que um cubo de vidro” Nikos Salingaros.*

Este capítulo apresenta o que é a GF, suas origens e qualidades como SG. O matemático polonês Benoît Mandelbrot (1924-2010) percebeu que a geometria Euclidiana não representava adequadamente objetos naturais como nuvens, montanhas, litorais, etc. Para Mandelbrot (1983:1) a Geometria Euclidiana não descreve de maneira adequada a natureza:

*“Por que a geometria é chamada de fria e seca? Uma das razões encontra-se na sua incapacidade de descrever a forma de uma nuvem, uma montanha, um litoral ou uma árvore. Nuvens não são esferas, montanhas não são cones, litorais não são círculos, e cascas de árvores não são regulares e polidas, nem relâmpagos viajam em uma linha reta”.*

Na busca da representação de formas naturais, Mandelbrot criou o termo Fractal, derivado da palavra latina que significa fragmentado, quebrado ou descontínuo. Os fractais são objetos matemáticos cuja principal propriedade é a repetição infinita de um procedimento produzindo autossimilaridade. Essa geometria está presente em diversas áreas do conhecimento: matemática, biologia, medicina, economia, geografia, meteorologia, física, astronomia e também na arquitetura.

O primeiro fractal foi descrito em 1861 por Karl Weierstrass e foi chamado de curva patológica por causa de seu comportamento irregular. Georg Cantor, que foi aluno de Weierstrass, descreveu o Conjunto de Cantor em 1883. Por volta de 1890, Giuseppe Peano descreveu matematicamente o que ele chamou de “curva que preenche o espaço” (*space-filling curve*) ou curva de Peano. Outra curva foi descrita em 1904 por Helge von Koch, que possui uma área finita mas um comprimento infinito, conhecida por Ilha de Koch ou Floco de

neve de Koch. Em 1916 Waclaw Sierpinski apresentou o fractal chamado de Triângulo de Sierpinski. Em 1918 Gaston Julia publicou sobre a iteração de funções racionais o que posteriormente nomeou um fractal como conjunto de Julia. O conjunto de Cantor, a curva de Peano, a Ilha de Koch e o Triângulo de Sierpinski serão explicados com detalhes adiante.

O interesse em objetos fractais se motivou originalmente pelo estudo de sistemas complexos dinâmicos pelos matemáticos franceses Henri Poincaré, Pierre Fatou e Gaston Julia (SALINGAROS, 1999a) e dos matemáticos citados anteriormente. Contudo, foi somente no final dos anos 70, com o acesso a computadores mais rápidos e com recursos gráficos mais potentes da IBM, que Benoît Mandelbrot começou a simular essas estruturas. Esses objetos matemáticos apresentam características como a auto-organização, o caos ordenado e a emergência de formas. Harris (2012: 14) elenca as características úteis da forma fractal para arquitetura: *“Self-similarity, Holism, Structure, Generative quality, Dimension, Organizational depth, Recursive/nested quality, Geometric diagram”*.

Bovill (2000) afirma que o estudo da GF é uma maneira de compreender a complexidade da natureza. Por outro lado, Salingaros (1999a) explica um problema na educação de modo geral: *“[w]e have been trained – through our education – not to want to see the fractal qualities of nature”*. A educação matemática em todos os níveis ainda se concentra somente na geometria Euclidiana, que é usada como linguagem matemática para descrever, relacionar e manipular formas. A **Tabela 3** apresenta as diferenças entre as geometrias Euclidiana e Fractal.

**Tabela 3.** Comparação entre geometria fractal e euclidiana.

<b>Euclidiana</b>	<b>Fractal</b>
Tradicional (>2000 anos)	Monstros modernos (~45 anos)
Baseada em tamanhos e escalas característicos	Sem tamanho ou escala específicos
Adapta-se a objetos feitos pelo ser humano	Apropriada para formas naturais
Descrita por fórmulas	Algorítmica (recursiva)

Fonte: Adaptado de Peitgen e Saupe, 1988.

Harris (2012:254) descreve a GF como sendo: *“a grammar that incorporates transformations, iteration, and recursion”*. Fractais são gerados por meio de um processo chamado de **iteração**. A iteração fractal é um processo que segue uma regra de substituição por adição ou subtração de um elemento escalonado e autossimilar ao objeto inicial. **Uma função iterada** pode ser definida como a repetição de um bloco de ações em programa computacional. Iteração descreve o estilo de programação usado em linguagens imperativas, já a recursão tem uma abordagem mais declarativa.

**Recursão** é um método de definir funções na qual a função é programada para aplicar a sua própria definição, ou seja, repetir o mesmo processo. Portanto em funções recursivas a solução de um problema depende da solução de partes menores do mesmo problema. Uma **função recursiva** é uma estratégia de programação para dividir um problema em partes menores, mas similares ao problema maior, então resolver os problemas menores e em seguida combinar os resultados.

Harris (2012:249) propõe um conceito de algoritmo recursivo e iterativo em relação à geração de fractais:

*“A recursive algorithm is one that references itself until a specified state is reached and is integrated into the instruction set. Iterative algorithms utilize repetitive constructs such as loops, which are sets of instructions that are repeated a distinct number of times. Algorithms utilized for generating fractal form utilize a computational procedure that integrates both recursive and iterative algorithms. Algorithms are utilized in the design process by providing a framework for articulating and defining both the input data and procedures”.*

Salingaros (2012:12) explica que fractais: *“can be either built with accumulated accretions (patterns of ordered heterogeneity, spikes, granulations, “hairiness”), or instead have gaps or holes (perforations, sieves, hierarchically-ordered spacings)”*. A samambaia, por exemplo, segue um padrão de organização das folhas que apresenta autossimilaridade nas diferentes escalas (**Figura 14**). Os fractais criados por meio da iteração de expressões matemáticas simples podem produzir um comportamento complexo e irregular que parece aleatório. *“Es quizá la manera más simple de crear complejidad: iterando un patrón certo número de veces em escenarios cada vez más pequeños”* (WAGENSBERG, 2005:250).

**Figura 14.** Samambaia.



Zoom na folha de Samambaia em 3 escalas. Fonte: Livella, s.d.

Segundo Yessios (1987):

[t]he *fractal*, as a generative system, consists of an initial state of a shape (the *base*) and one or more *generators*. The generator, from the practical point of view, is a production rule<sup>5</sup>: replace each and every line segment of the base with the shape of the generator”.

Então, os elementos para produzir um fractal são um objeto inicial, o iniciador, e um gerador, que substitui o objeto inicial, em processo de iteração.

De acordo com Harris (2012:24):

“The basic processes underlying a category of fractals known as iterated function systems are surprisingly simple but produce incredibly complex natural forms. The repeated iterations of simple rules of formation create the vast array of complex structures of nature; hence the fractal credo can be summed up as “simplicity equals complexity”.

O número de iterações alimenta a quantidade de informação do objeto. Em um fractal como a ilha de Koch (**Figura 15**) conforme o número de iterações aumenta o perímetro do objeto aumenta infinitamente, enquanto a área tende a se manter constante. Ou seja, o acréscimo de área diminui gradativamente conforme o número de iterações aumenta.

**Figura 15.** Ilha de Koch.

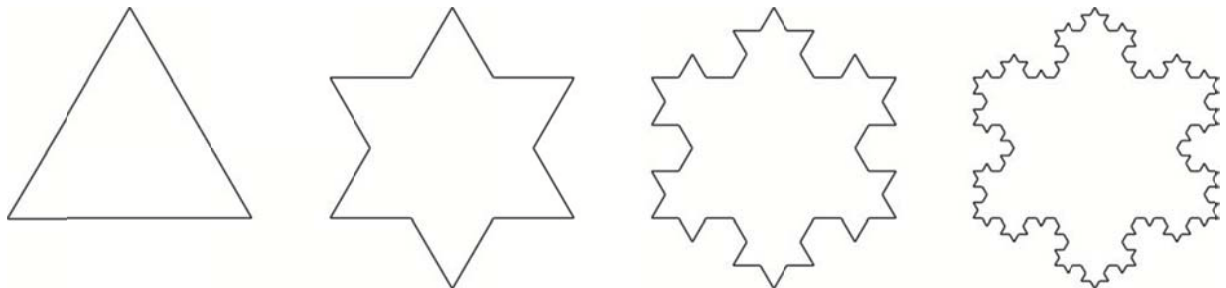


Figura Inicial e 3 iterações da Ilha de Koch. Fonte: Do autor, 2016.

Outra maneira de gerar formas fractais são os IFS - *Iterated Function System* (sistemas de funções iteradas). Lorenz (2002:20) explica que os IFS “[...] belong to the types of linear fractals [...]. They are produced by polygons that are put in one another and show a high degree of similarity to nature” (**Figura 16**). Os IFS podem ser utilizados como gerador de formas semelhantes às encontradas em vegetais. Outro processo de construção de fractais são os *L-systems* ou sistemas de Lindenmayer (LINDENMAYER e PRUSINKIEWICZ, 2004:1), que usam o procedimento de *rewriting*, que pode ser explicado como “a technique for defining complex objects by successively replacing parts of a simple initial object using a set of rewriting rules or productions”. Esses sistemas foram introduzidos em 1968 por Lindenmayer como um método de estudar o desenvolvimento de organismos multicelulares

<sup>5</sup>Isto remete ao *Post Canonical System*, criado por Emil Post, que transforma um conjunto de elementos repetidamente aplicando um conjunto de regras específicas.



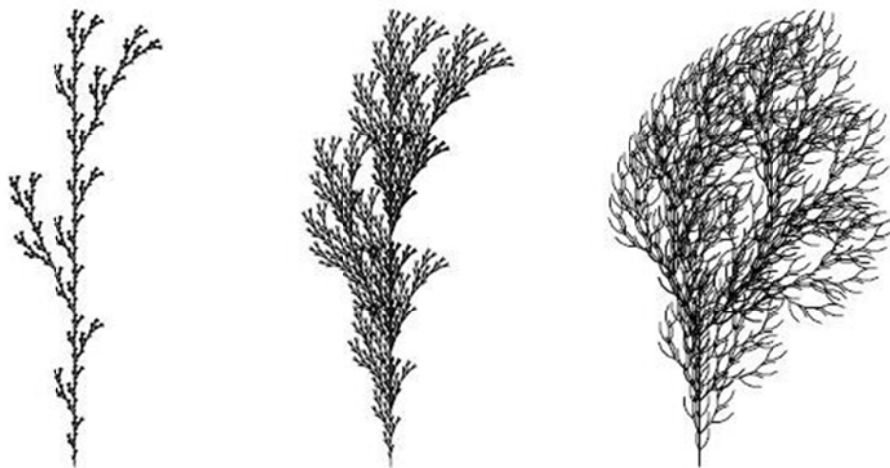
simples, e são parte de uma linguagem computacional formal (*IBID.*). Essa gramática formal pode ser usada para o desenho de vegetação, árvores e algumas variedades de formas (**Figura 17**). Os *L-systems*, os IFS, as funções iteradas e as funções recursivas são métodos de aplicação de uma função repetitivamente que provoca transformações, a maneira de operar pode ser com formas ou símbolos como sugere Mitchell (1978).

**Figura 16.** IFS Samambaia.



Fonte: Barnsley, 2000.

**Figura 17.** L-systems.



Estruturas geradas com semelhança a tipos de vegetação. Fonte: Lindenmayer, Prusinkiewicz, 2004.

Uma característica muito aplicada em **análises** é a dimensão fractal que está relacionada com a dimensão de Hausdorff-Besicovitch, ou dimensão fracionária. Segundo Mandelbrot (1998:14):

*“uma das características principais de todo objeto fractal é a sua dimensão fractal, que será representada por D. Esta é uma medida do grau de irregularidade e de fragmentação. Um fato muito importante: ao contrário dos números dimensionais correntes, a dimensão fractal*

*pode muito bem ser uma fração simples, como 1/2 ou 5/3, ou mesmo um número irracional, como  $\log 4/\log 3 \sim 1,2618\dots$  ou  $\pi$ . Assim, é conveniente dizer, a respeito de certas curvas planas muito irregulares, que a sua dimensão fractal se situa entre 1 e 2, a respeito de certas superfícies muito enrugadas e cheias de pregas, que a sua dimensão fractal está entre 2 e 3 e, enfim, definir conjuntos de pontos sobre uma linha cuja dimensão fractal está entre 0 e 1”.*

Certos objetos matemáticos não seguem os parâmetros euclidianos (ponto = 0, reta = 1, plano = 2 e volume = 3) e possuem dimensão que não é um número inteiro, e sim uma fração ou um número irracional. Ou seja, dimensão fractal é a maneira de medir a irregularidade dos objetos fractais. Um exemplo clássico ajuda a esclarecer o conceito de dimensão fracionária. Qual a dimensão de um novelo de lã? A resposta depende do ponto de vista do observador. Mandelbrot (1998:21) explica:

*“Para confirmar, mostraremos que um novelo com 10cm de diâmetro feito de um fio de 1mm de diâmetro possui, de uma forma um pouco latente, diversas dimensões efetivas distintas. Se se usar um grau de resolução de 10m, trata-se de um ponto e, portanto, de uma figura de dimensão zero. Para um grau de resolução de 10cm, trata-se de uma bola tridimensional. Para uma resolução de 10mm, é um conjunto de fios e, portanto, uma figura unidimensional. Para um grau de resolução de 0,1mm, cada fio transforma-se numa espécie de coluna e o todo volta a ser tridimensional. Para um grau de resolução de 0,01mm, cada coluna resolve-se em diversas fibras filiformes e, de novo, o todo é unidimensional. Numa análise mais apurada, o novelo é representado por um número finito de átomos pontuais e o todo tem, mais uma vez, dimensão zero. E assim por diante: o valor da dimensão não pára de variar!”.*

O cálculo da dimensão fractal está descrito abaixo para a compreensão desta característica. Determina-se a dimensão fractal através da seguinte fórmula:

$$D = \log N / \log n$$

Onde:

D = Dimensão

N = número de peças em cada iteração

n = ampliação necessária para chegar ao objeto original

Os fractais podem ser divididos basicamente em duas categorias: lineares e não lineares (Tabela 4). Os conjuntos fractais podem ser chamados de lineares ou determinísticos, de acordo com Ostwald (2009), outras designações são puros, ideais ou autossimilantes. De acordo com Ibrahim e Krawczyk (2006), fractais lineares são “[...] *generated from the replacement of a group of vectors, such like the Dragon Curve* [...]” e fractais não lineares,



“[...] are fractals that are generated as a group of points in the complex plane, such as the Mandelbrot set and the Julia set [...]”.

**Tabela 4.** Categorias de fractais não lineares e lineares.

<b>Fractais</b>	<b>Categoria</b>	<b>Exemplos</b>
Não Lineares	Números Complexos	Conjuntos de Julia, Conjuntos de Mandelbrot
	Orbitais*	Atratores Estranhos, Mapa de Hénon.
Lineares	Curvas e L-Systems	Ilha de Koch, Curva de Peano
	IFS e MRCM**	Samambaia de Barnsley, Triângulo de Sierpinski

\*Associados à Teoria do Caos.

\*\* *Multiple Reduction Copy Machine*: é um algoritmo que permite simular certas condições com uma máquina copiadora real.

Fonte: Adaptado de Ibrahim, Krawczyk, 2006.

### 3.1 Fractais Lineares<sup>6</sup>

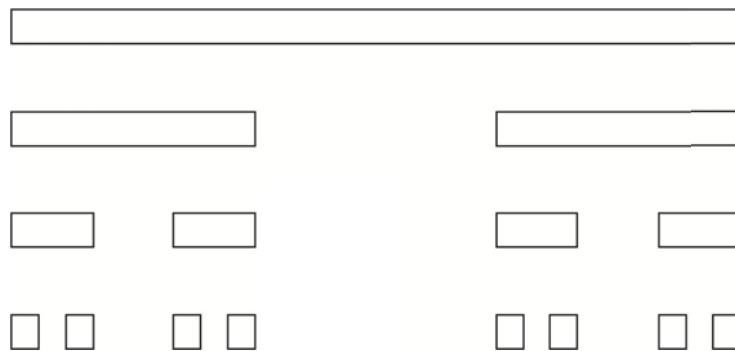
A seguir são apresentados alguns fractais clássicos com os respectivos cálculos da dimensão fractal. Observar que a dimensão de fractais lineares tende a estar entre 0 e 2; sendo dimensões próximas a 0, objetos como nuvens de pontos; próximas a 1, objetos mais lineares; e próximas a 2, objetos quase planos.

#### Poeira ou Conjunto de Cantor

O iniciador do Conjunto de Cantor é um segmento de reta qualquer. Divide-se o segmento em três partes iguais e desconsidera-se (subtrai-se) o segmento central. O gerador é um elemento subtrativo (**Figura 18** – os segmentos foram desenhados com uma espessura para melhor compreensão). Repetir a operação com os segmentos restantes, infinitamente.

Dimensão Fractal:  $N=2$  e  $n=3$ ;  $D = \text{Log } 2 / \text{Log } 3$ ;  $D \cong 0,63\dots$

**Figura 18.** Conjunto de Cantor.



Fonte: Do autor, 2016.

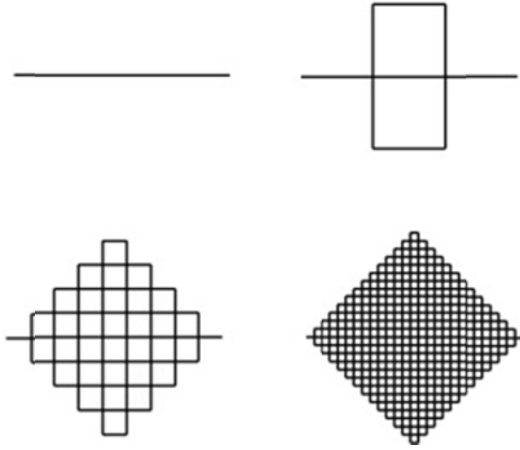
#### Curva de Peano

O iniciador da Curva de Peano é uma reta. Divide-se em três partes iguais e substitui-se pelo gerador de nove segmentos iguais. A partir da primeira iteração, substitui-se novamente cada segmento pelo gerador escalonado (**Figura 19**). Assim:  $N=9$  e  $n=3$ ;  $D = \log 9 / \log 3$ ;  $D = 2$ . A dimensão equivalente a 2 significa que essa curva preenche o espaço ocupando a dimensão de um plano. Também pode ser desenhada “sem tirar o lápis do papel”, como mostra a **Figura 20**, na qual se alterou o ponto de encontro dos segmentos para ficar visível. A curva de Peano é considerada um paradoxo (LORENZ, 2002), pois é ao mesmo tempo um objeto bidimensional (plano) e uma curva unidimensional (linha). Algumas

<sup>6</sup> Adaptado de Sedrez (2009).

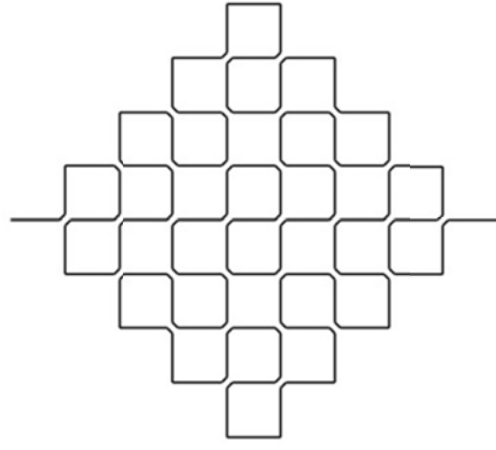
estruturas naturais também possuem comportamento semelhante para preencher o espaço: pulmões, cérebro, raízes de árvores.

**Figura 19.** Curva de Peano.



Fonte: Do autor, 2016.

**Figura 20.** Curva de Peano (alterada).



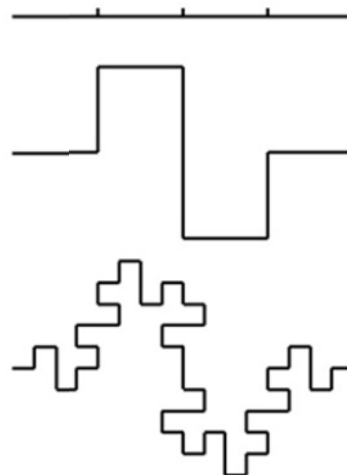
Fonte: Do autor, 2016.

### Curva de Minkowski

A Curva de Minkowski é construída a partir de um iniciador dividido em quatro segmentos iguais. Os segmentos centrais são substituídos por dois quadrados, um sem a base e outro sem o topo, conforme a **Figura 21**.

Dimensão Fractal  $N=8$  e  $n=4$ ;  $D = \text{Log}8 / \text{Log}4$ ;  $D = 1,5$ .

**Figura 21.** Curva de Minkowski.

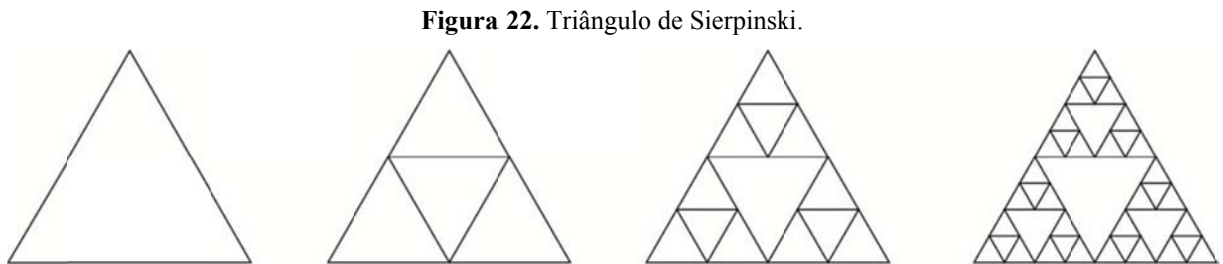


Fonte: Do autor, 2016.

### Triângulo de Sierpinski

Para criar o Triângulo de Sierpinski (**Figura 22**), deve-se começar com um triângulo equilátero e remover o triângulo central do iniciador. O triângulo a ser removido é definido pelos pontos centrais de cada lado do triângulo inicial.

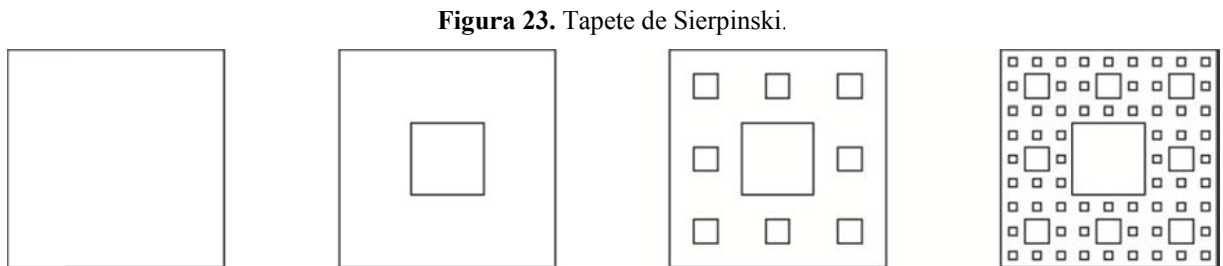
Dimensão fractal:  $N=3$  e  $n=2$ ;  $D = \text{Log}3 / \text{Log}2$ ;  $D = 1,58\dots$



Fonte: Do autor, 2016.

Outro exemplo é o Tapete de Sierpinski, que segue o mesmo processo iterativo do Triângulo de Sierpinski (**Figura 23**), porém retirando um quadrado central.

Dimensão Fractal:  $N=8$  e  $n=3$ ;  $D = \text{Log}8 / \text{Log}3$ ;  $D = 1,89\dots$

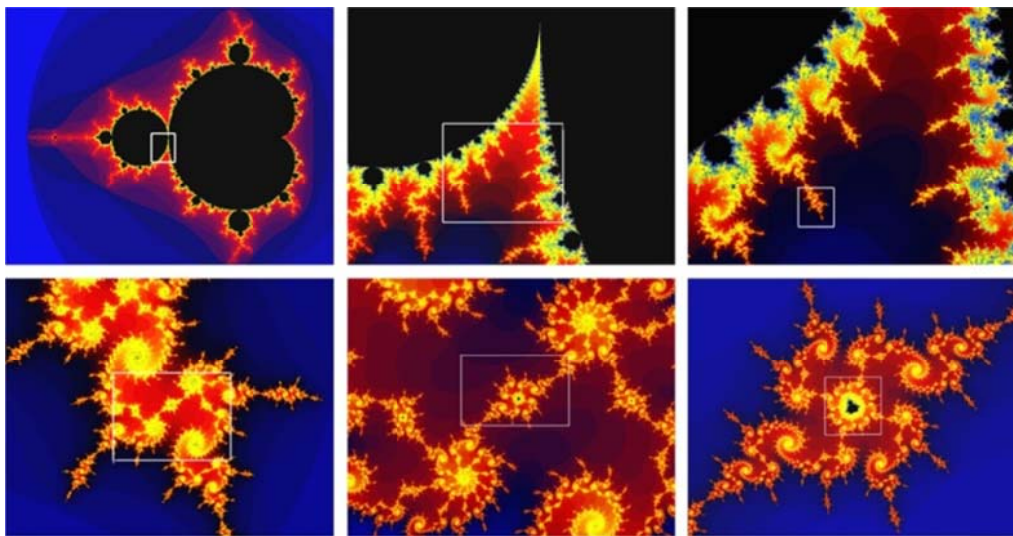


Fonte: Do autor, 2016.

### 3.2 Fractais não-lineares<sup>7</sup>

Os fractais não-lineares ou aleatórios também podem ser chamados de autossimilares ou estatísticos. Estes fractais estão conectados com a teoria do Caos e são obtidos por meio de equações algorítmicas. Cada ponto da equação é relacionado a certo número iterado resultando em um novo número. Esse procedimento é repetido até que os valores se aproximem de números infinitos, converjam ou flutuem entre diversos números. Dependendo do resultado eles podem ser coloridos diferentemente. O Conjunto de Mandelbrot (**Figura 24**) é o mais conhecido objeto fractal, devido a sua alta complexidade e claro originalidade.

**Figura 24.** Conjunto de Mandelbrot.

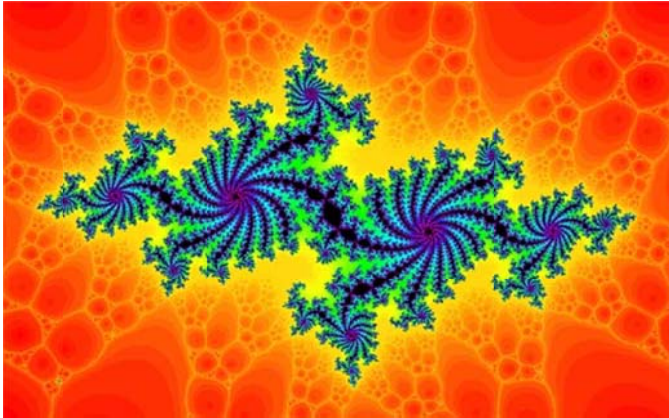


Fonte: Keyserling, s.d.

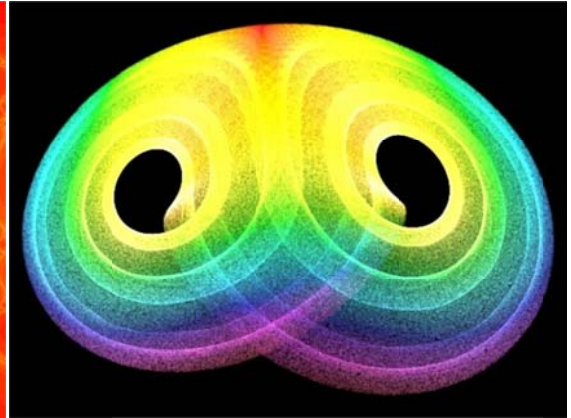
Esse objeto, apesar de apresentar autossimilaridade, possui detalhes variados nas diferentes escalas. Ele foi visualizado em um computador pela primeira vez por Mandelbrot a partir dos estudos de Gastón Julia e Pierre Fatou. No Conjunto de Mandelbrot, definido como um conjunto de pontos no plano complexo é possível encontrar alguns conjuntos de Julia (**Figura 25**).

O Atrator Estranho de Lorenz (**Figura 26**) tem esse nome porque a trajetória de todos os pontos iniciais do conjunto acaba seguindo uma ordem, ou seja, atraindo para o mesmo lugar. Porém, uma pequena variação no ponto inicial afeta a trajetória obtida. Por isso, esse conjunto também apresenta o que se conhece por efeito borboleta. O atrator de Lorenz original é definido por três equações diferenciais:  $dx/dt = -10x + 10y$ ;  $dy/dt = 28x - y - xz$ ;  $dz/dt = -8/3z + xy$ ; onde  $x$ ,  $y$  e  $z$  são variáveis,  $t$  é o tempo e  $d/dt$  é a taxa de variação.

<sup>7</sup> Adaptado de Sedrez (2009).

**Figura 25.** Conjunto de Julia.

Fonte: Keyserling, s.d.

**Figura 26.** Atrator Estranho.

Gerado no programa Chaoscope.

Fonte: Do autor, 2016.

Fractais podem ainda ser objetos em três dimensões: “*fractal sets are curves, others are surfaces, still others are clouds of disconnected points*” (MANDELBROT, 1977). O processo fractal tem que ser paralisado em certo número de iterações, e então os programas computacionais podem gerar renderizações dos pontos no espaço. O artista Peter Jansen produziu fractais gerados por um programa de visualização de objetos fractais (Chaoscope) com prototipagem rápida (Figura 27, Figura 28, Figura 29). Em 2009, com parceria com a empresa MGX by Materialise, ele produziu a luminária Tulip (Figura 30, Figura 31) com Sinterização Seletiva a Laser, cujo desenho originou-se da figura 3B Caos Simétrico (Figura 27).

**Figura 27.** 3B Caos Simétrico.

Fonte: Jansen, 2007.

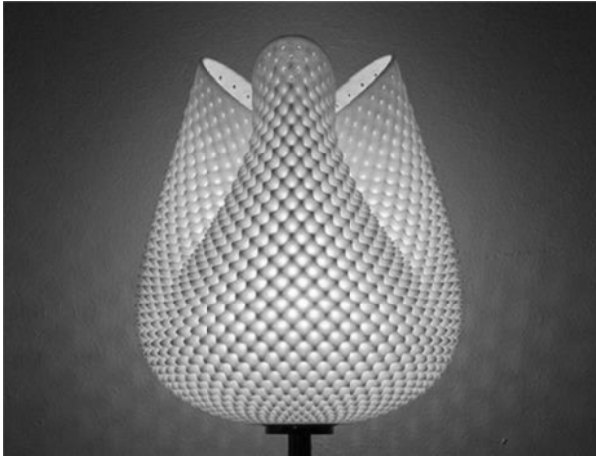
**Figura 28.** 8C.

Fonte: Jansen, 2007.

**Figura 29.** *Sortie de Secours*.

Fonte: Jansen, 2007.

**Figura 30.** Luminária Tulip (acesa).



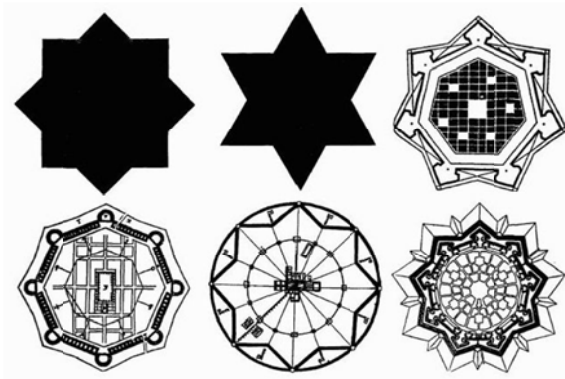
Fonte: Jansen, 2009.

**Figura 31.** Luminária Tulip.



Fonte: Jansen, 2009.

Figura 32. Ilha de Koch e fortes renascentistas.



Fonte: Batty, Longley, 1994.

#### 4 Arquitetura e Fractais

*“Fractal architecture could be good for you” Yannick Joye.*

Este capítulo trata da aproximação da arquitetura com a teoria dos fractais. Brevemente se apresenta alguns exemplos de arquitetura com características intuitivas de fractais, em seguida, se analisa uma revisão bibliográfica sobre o tema. Nesta tese se evitou usar o termo “arquitetura fractal”, apesar de muitos autores adotarem essa denominação. “Arquitetura com aspectos fractais” ou “apropriação de fractais pela arquitetura” parecem ser expressões mais apropriadas.

Segundo Ostwald (2009), nas últimas décadas mais de 200 projetos de arquitetura ou de teoria da arquitetura foram publicados abordando GF. Apesar de Ostwald não identificar todos esses trabalhos, neste capítulo são apresentados exemplos de projetos ou obras que utilizam conceitos da GF.

A seção 4.1 faz uma revisão bibliográfica de literatura cinza e outras fontes encontradas. A seção 4.2 apresenta alguns projetos contemporâneos que aplicaram fractais no processo de projeto. Por fim, a seção 4.3 se refere ao *mapping study* elaborado a partir de buscas em base de dados e portais de periódicos.


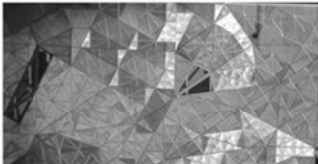



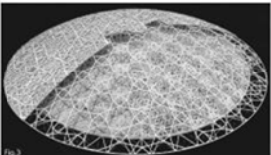

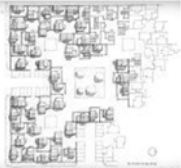
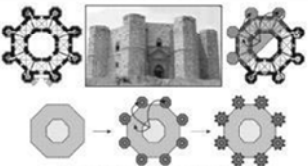
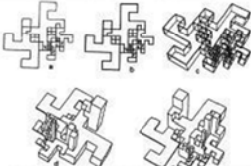

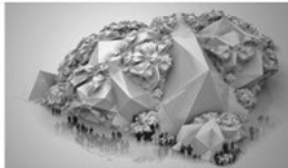


#### 4.1 Aplicações em arquitetura

Enquanto um fractal tem iterações infinitas, sabe-se que esse comportamento não é possível em um projeto de arquitetura. Os processos fractais têm que ser combinados com outras estratégias de projeto para que possam ser usados em arquitetura. Por exemplo, mesmo na natureza as iterações fractais não se prolongam indefinidamente (WAGENSBERG, 2005). Na arquitetura isto também ocorre; há um limite de iterações possíveis e necessárias em um produto arquitetônico.

O **Quadro 1** apresenta exemplos de aplicações da GF na arquitetura em períodos anteriores ao século XX e na arquitetura contemporânea (a partir da década de 80). Como se pode ver, sua utilização pode acontecer em diferentes escalas e com diferentes propósitos.

**Quadro 1.** Arquitetura e fractais.

FUNÇÃO	APLICAÇÃO HISTÓRICA	APLICAÇÃO CONTEMPORÂNEA
<b>Ornamento</b>	 <p>Igreja São Matthias - Sec. XIV</p>	 <p>Lab Architecture Studio - Federation Square - 1997</p>
<b>Estrutura</b>	 <p>Pont du Gard - Romanos - Sec. I A.C.</p>	 <p>Tote Restaurant - Serie Architects - 2009</p>
<b>Controle Climático</b>	 <p>Muxarabê tradicional</p>	 <p>Louvre Abu Dhabi - Jean Nouvell - 2015</p>
<b>Implantação: Projeto Urbanístico</b>	 <p>Assentamento Ba-ila</p>	 <p>Belapur - Charles Correa - 1986</p>
<b>Planta: Projeto Arquitetônico</b>	 <p>Castelo Del Monte - Sec. XIII</p>	 <p>Fractal Studio - Chris Yessios - 1987</p>
<b>Volumetria</b>	 <p>Templos Shikharas - Sec. I A.C.</p>	 <p>Recursive Growth - Mark Fornes - 2008</p>

Classificação de acordo com a função e período histórico. Fonte: Do autor, 2016.

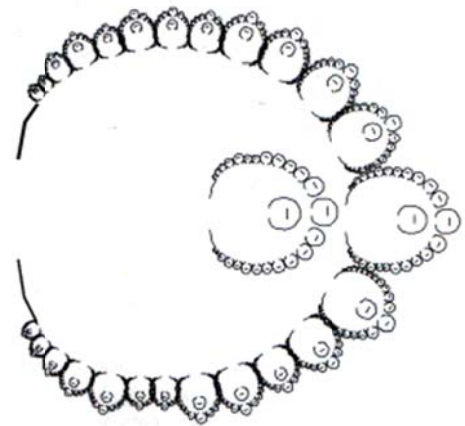
O conceito de aplicação recursiva de regras simples pode ser encontrado na arquitetura muito antes da criação do termo GF. O matemático Ron Eglash (1999), no seu livro *African fractals: modern computing and indigenous design*, estuda na arquitetura africana padrões fractais em cidades e motivos decorativos. No caso de Ba-Ila (**Figura 33**, **Figura 34**) as casas estão dispostas em uma configuração elíptica. Em um dos lados fica a entrada e no lado oposto os aposentos do patriarca. Uma série de elipses forma compartimentos desde a entrada, aumentando gradativamente de tamanho. O assentamento é um módulo no qual a compreensão do todo se dá a partir do entendimento da parte, reproduzindo a mesma configuração (EGLASH, s.d.; TEDglobal, 2007).

**Figura 33.** Assentamento Ba-Ila, Zâmbia.



Fonte: Eglash, s.d.

**Figura 34.** Geometria do assentamento.



Fonte: Eglash, s.d.

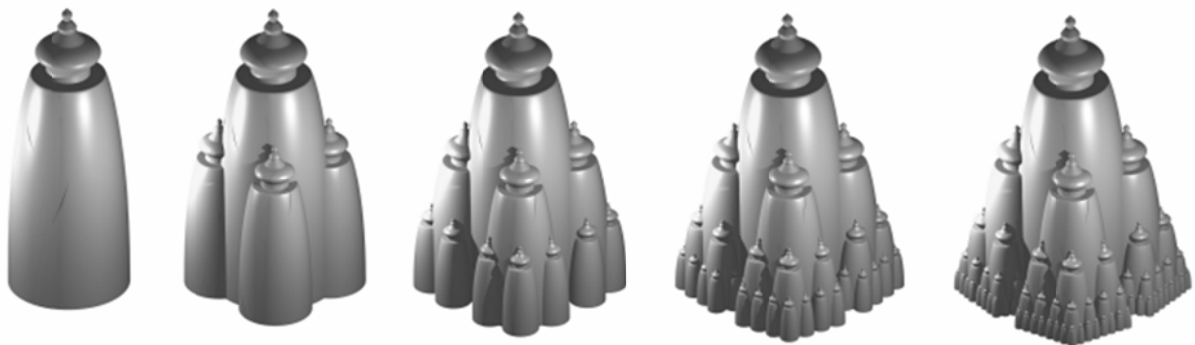
Eglash (TEDGlobal, 2007) comenta que os povos africanos que estudou estavam conscientes destes padrões fractais em sua arquitetura, sendo uma tradição construir com recursos matemáticos com um propósito específico. A arquitetura vernacular tende a possuir propriedades fractais segundo Salingeros (1999a), nossa mente tem a tendência de construir estruturas com essas propriedades. Outras cidades americanas e europeias foram estudadas por Michael Batty e Paul Longley (1994) apresentando padrões de autossimilaridade em diferentes escalas, por exemplo, Londres e Cardiff.

A Torre Eiffel apresenta um padrão fractal identificado por Mandelbrot (1983:131): “a torre que Gustave Eiffel construiu em Paris deliberadamente incorpora a ideia de uma curva fractal cheia de pontos ramificados”. A estrutura metálica da torre é composta por quatro níveis na forma da letra ‘A’ resultando em uma estrutura interconectada por elementos autossimilares repetidos em escalas decrescentes cujos vazios retiram o peso da estrutura.

Ostwald (2001) afirma que castelos Medievais, igrejas Barrocas, templos Hindus e obras de Frank Lloyd Wright ou Louis Sullivan não são criações conscientes de projetos com fractais apesar de apresentarem algo que remete a essa geometria. Sala e Cappellato (2004) identificam a autossimilaridade presente na arquitetura de templos Hindus e Maias, arquitetura Tailandesa, Islâmica, Russa e Japonesa, Gótico e Barroco veneziano. O mesmo uso da autossimilaridade ocorre em arquitetura mais recente na ópera de Sidney de Jorn Utzon, na midiateca de Mario Botta, Casa Palmer de Frank Lloyd Wright (SALA, CAPPELLATO, 2004). As autoras ainda fazem uma análise de obras que usam biomorfismo de animais e rochas em projetos de grande complexidade, mas no qual os resultados não são diretamente provenientes da GF.

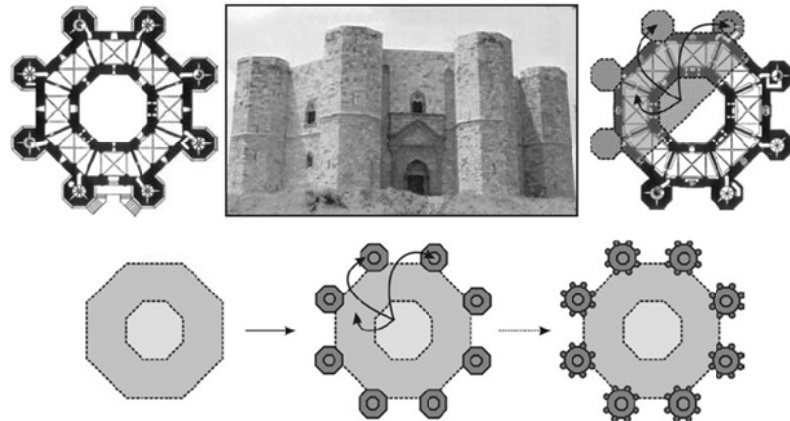
Os templos Hindus apresentam padrões de autossimilaridade, e essa característica está relacionada com conceitos própria religião, como a concepção do universo. Joye (2007) apresenta um esquema de como são concebidos esses templos (**Figura 35**).

**Figura 35.** Geração de um templo Hindu.



Fonte: Joye, 2007.

O castelo Del Monte, construído no século XIII na Itália é um dos exemplos claros de como um padrão recursivo pode ser usado em projeto. Neste caso as torres têm a função de estruturar e também proteger o castelo. A **Figura 36** mostra como os octógonos se repetem em três iterações

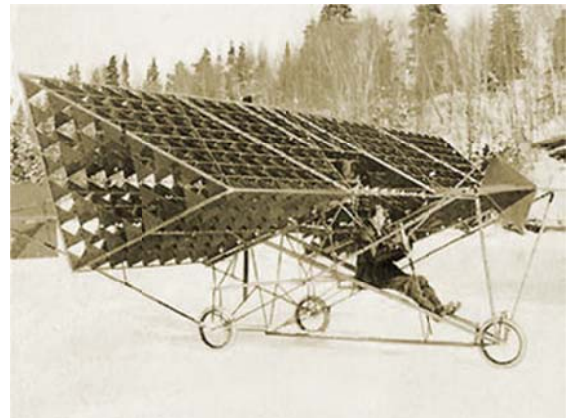
**Figura 36.** Castelo Del Monte.

Fonte: Lorenz, 2002.

Uma experiência interessante com fractais são as pipas e aviões projetados por Alexander Graham Bell no início do séc. XX. Chamadas de *Tetrahedral Kite*, as pipas serviram de modelo para o avião Cygnet, claramente utilizando o triângulo de Sierpinski como forma estabilizadora (Figura 37, Figura 38).

**Figura 37.** Cignet II

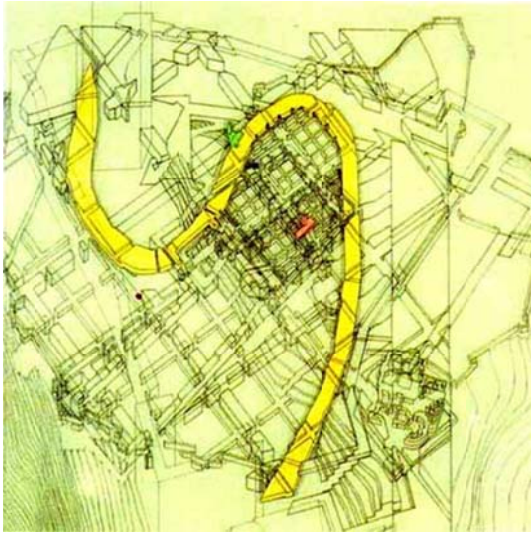
Font: Bulletin., 1909.

**Figura 38.** Cignet III

Font: Canada, 1912.

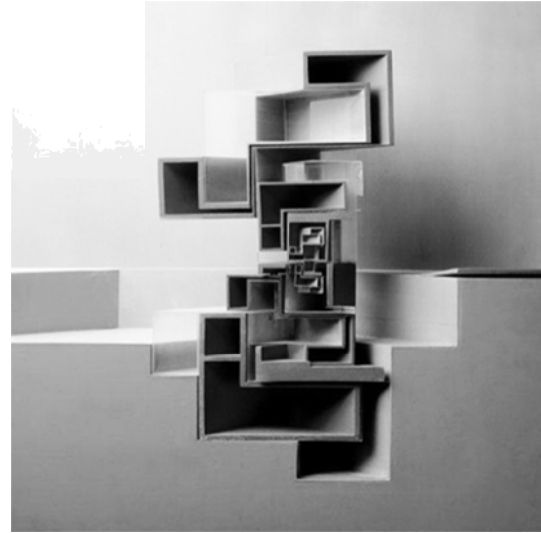
Um projeto significativo no uso de fractais em arquitetura é *Eros, Arrows and other eros*, de Peter Eisenman, desenvolvido em 1985 (Figura 39). O projeto se apropria do conceito dos fractais, como explica Eisenman (1988), porém não diretamente de sua geometria. Anteriormente Eisenman havia projetado uma praça para a cidade Veneza, Cannaregio em 1978 (Figura 40). O projeto manipula o projeto de Le Corbusier para o hospital de Veneza por meio da repetição a justaposição de elementos em diferentes escalas.

**Figura 39.** *Eros, Arrows and Other Errors.*



Fonte: Eisenman, 1985.

**Figura 40.** Cannaregio Town Square.

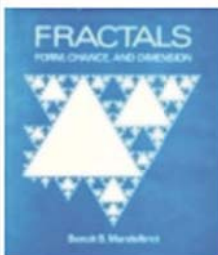
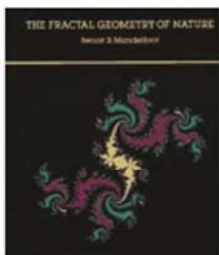

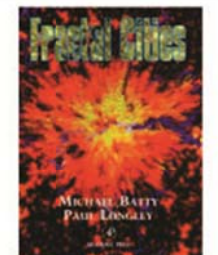
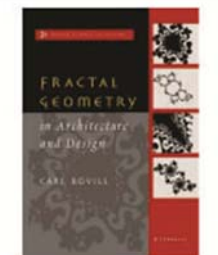
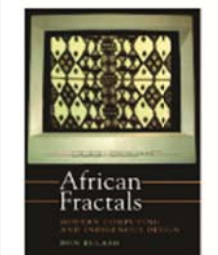



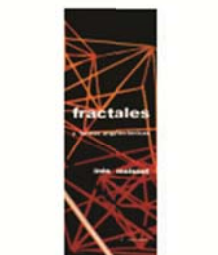

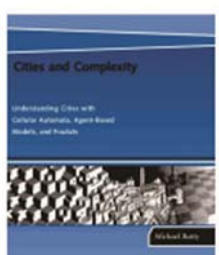



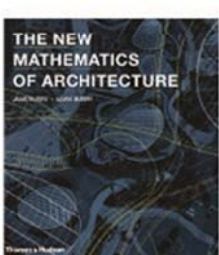
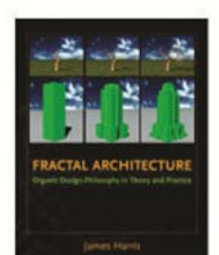


Fonte: Frank, 1978.

A seguir são analisadas publicações (livros, dissertações e teses) sobre arquitetura e fractais. O **Quadro 2** apresenta as principais referências utilizadas nesta pesquisa.



Quadro 2. Principais referências sobre fractais e arquitetura.

				
1977 Fractals: form, chance and dimension Benoit Mandelbrot	1982 The fractal geometry of nature Benoit Mandelbrot	1988 Eisenmanesie Peter Eisenman	1994 Fractal cities Michael Batty e Paul Longley	1996 Fractal geometry in architecture and design Carl Bovill
				
1999 African fractals Ron Eglash	2001 Fractals in the new architecture in: Principles of Urban Structure Nikos A. Salingaros	2002 The new paradigm in architecture Charles Jencks*	2002 Fractals and fractal architecture Wolfgang E. Lorenz**	2003 Fractales y formas arquitectónicas Inés Moisset
				
2004 Architetture della complessità Nicoletta Sala e Gabriele Cappellato	2006 Fractal architecture Kenneth Haggard et al.	2007 Cities and complexity Michael Batty	2009 Fractal architecture Michael Oswald	2009 Forma fractal no ensino de projeto arquitetônico assistido por computador Maycon Sedrez**
				
2010 Twelve lectures on architecture Nikos A. Salingaros	2012 The new mathematics of architecture Jane Burry e Mark Burry	2012 Fractal architecture James Harris		

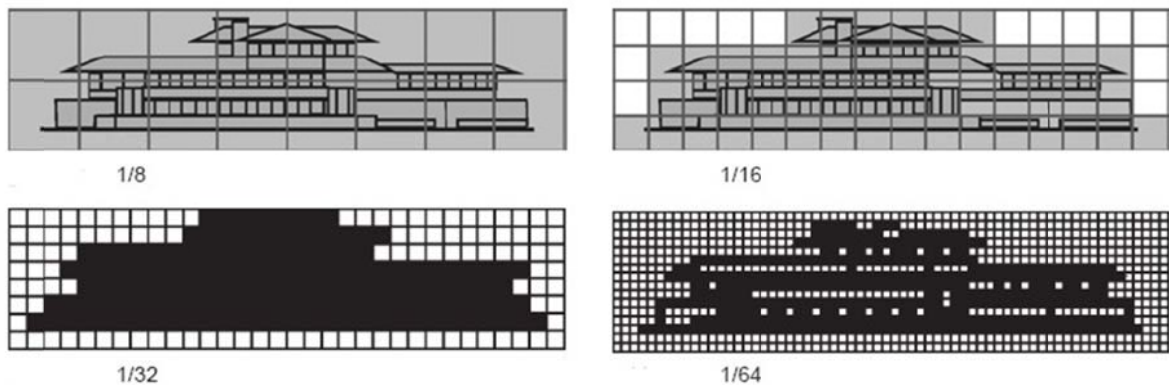
\*Edição revisada em 2002, com a inclusão do capítulo “Arquitetura Fractal”.

\*\* Dissertações de mestrado.

Fonte: Do autor, 2016.

Bovill (1996), no livro *Fractal geometry in architecture and design*, descreve as características da GF aplicada no método de contagem de quadrados para calcular a dimensão fractal de fachadas (Figura 41). Este processo foi utilizado por diversos autores como um método analítico.

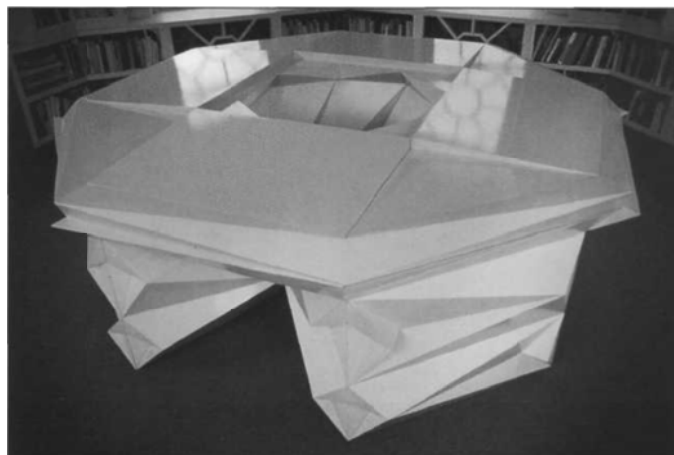
**Figura 41.** Casa Robbie.



Fonte: Bovill, 1996.

Charles Jencks (1997a) dedica um capítulo em seu livro *The architecture of the Jumping Universe*, no qual enfatiza a autossimilaridade como uma característica da arquitetura com aspectos fractais. No capítulo *Simplicity and Complexity* ele explica a ciência da complexidade e a complexidade em arquitetura e urbanismo, questionando-se porque esse “paradigma” é importante e o que pode se reconhecer nele. No capítulo “*In which language shall we build?*” a não-linearidade, a emergência, o caos e os fractais são estudados para a compreensão dessas interações na arquitetura. Dentre as experimentações feitas por Jencks está a mesa fractal (Figura 42).

**Figura 42.** Fractal Desk.

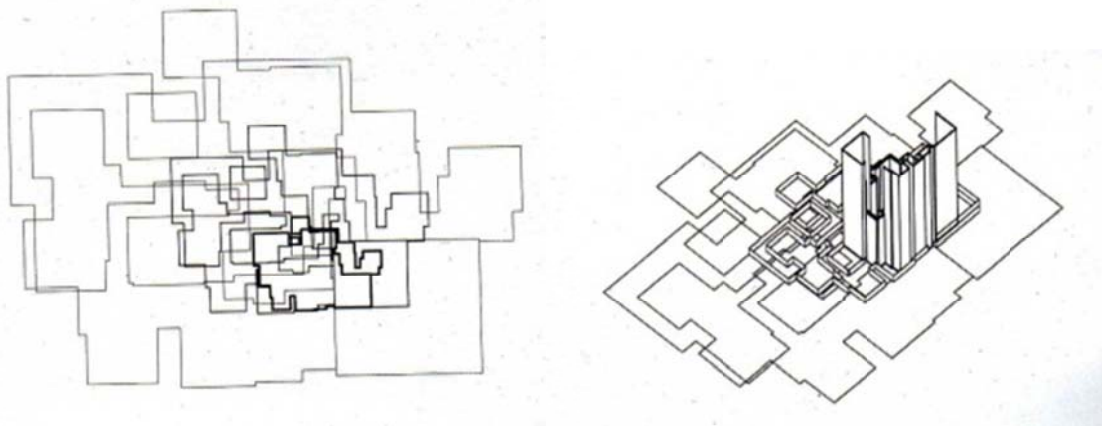


Fonte: Jencks, 1997.

Jencks (2002), no livro *The new paradigm in architecture: the language of post-modernism*, inclui um capítulo sobre a complexidade em arquitetura. Ele acredita que a teoria da Complexidade é utilizada na arquitetura de maneira diferente das outras ciências. No capítulo chamado “Arquitetura Fractal” ele apresenta como alguns projetos que abordam os fractais ou comportamentos recursivos, o que, para o autor, consiste em um novo paradigma.

Moisset (2003), no livro *Fractales y formas arquitectónicas*, propõe a utilização da GF na composição formal da arquitetura. Partindo de técnicas de maquetaria e utilizando materiais como madeira e papel, a autora propõe atividades de construção de objetos fractais. São cinco experiências projetuais que funcionam como SGs: traçado regulador qualificado, seção perfilada da planta, seção perfilada do corte, módulos fractais bidimensionais e sobreposição de escalas (Figura 43).

**Figura 43.** Sobreposição de escalas.



Fonte: Moisset, 2003.

Haggard, Cooper e Gyovai (2006), no livro *Fractal architecture: design for sustainability*, tratam da sustentabilidade sob a ótica da complexidade. Os autores buscam uma relação do edifício com o local implantado, eliminando a abstração modernista e interagindo com o clima, sociedade, cultura e ecologia locais. Os fractais são utilizados por seus conceitos, como recursividade, auto-similaridade e o SG é considerado de maneira bastante abstrata.

Ostwald (2009), no livro *Fractal Architecture*, apresenta um dos mais completos estudos sobre a apropriação de fractais na arquitetura. Segundo ele, “[a]rchitects are described as playing with these ideas, using them as a form of authority to legitimise their actions and augment their philosophies” (IBID.:15). Por mais de trinta anos essa relação entre arquitetura e complexidade se alternou. O autor afirma que nos anos 80 os arquitetos usaram amplamente a teoria da Complexidade em projetos, mas que no começo dos anos 90 alguns



arquitetos já negavam qualquer conexão com a teoria do Caos. O autor ressalta que “[r]egardless of whether the appropriative act is superficial or deep the outcome is still potentially meaningful” (IBID.:21).

Ostwald explica que a apropriação dos fractais por arquitetos frequentemente envolvia apenas uma palavra ou frase. Contudo essa apropriação rasa nem sempre pode ser vista como algo negativo.

“[...] in some cases the resultant buildings [...] are critical successes. In a few cases such designs posited theoretical viewpoints that are challenging to the profession. [...] in others ghastly creations are produced, seemingly as reflections of the chaos inherent in the city!” (IBID.:35).

De acordo com Ostwald (*ibid.*) o conceito de “arquitetura fractal” apresenta muitos problemas conceituais e práticos. Por exemplo, um edifício jamais poderá ser matematicamente autossimilar em um número infinito de escalas. O conceito de “arquitetura fractal” não possui significado em termos científicos/matemáticos. É importante ressaltar, “[b]ecause geometry is traditionally the province of the mathematician or scientist, architecture does not produce systems of geometry, it appropriates and consumes them” (IBID.:186). A GF tem sido um objeto de estudo muito desejado e explorado pelos arquitetos nas últimas décadas. Ostwald (*ibid.*:213) complementa:

“[...] a lesson acquired from the study of fractal geometry should not necessarily result in the production of architecture that is fractal. [...] An understanding of the implication of fractal geometry should lead to an awareness of the presence of order within seemingly aleatory systems”.

Os motivos pelos quais os arquitetos se apropriam da GF para produzir seus projetos seriam (IBID.:103,104):

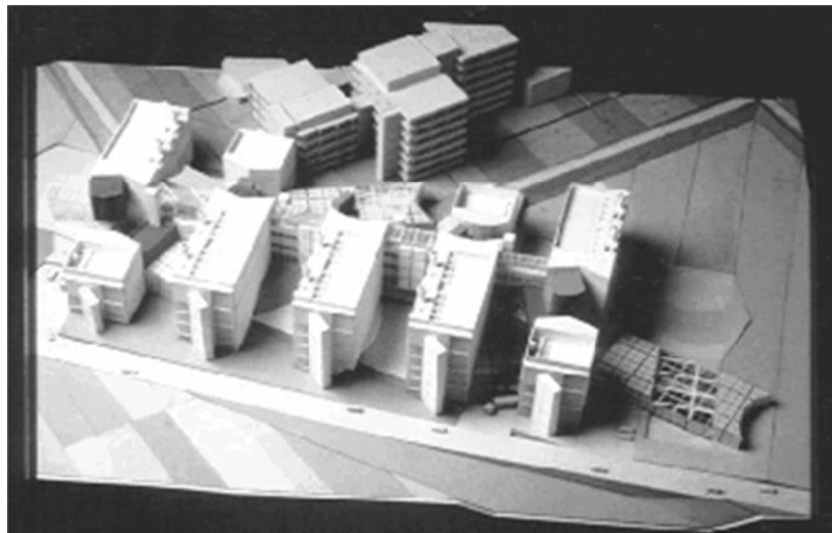
- 1) *legitimation* – [...] gaining authority [...];
- 2) *obfuscation* – [...] creating mystique [...];
- 3) *explanation* – [...] clarification [...];
- 4) *transmission* – [...] processing and transferring knowledge [...];
- 5) *theorization* – [...] being theoretical [...];
- 6) *equalization* – [...] equating architecture with another discipline;
- 7) *occupation* – [...] possession [...];
- 8) *accommodation* – [...] because it is convenient, natural or necessary [...].

Ostwald (*ibid.*) afirma que a apropriação de ícones fractais é a maneira que melhor expressa resultados coerentes em termos arquitetônicos, pois os ícones retêm a conexão com o seu significado original mesmo após a apropriação. Ele estuda oito projetos detalhadamente, sendo três categorizados como construídos, três impossíveis de serem

construídos e dois associados a projetos de interiores. Os projetos impossíveis de serem construídos foram exibidos na exposição chamada *Paper Architecture* (projetos que não saíram do papel) em 1991. Esses projetos são de arquitetos russos e possuem um discurso político marcante.

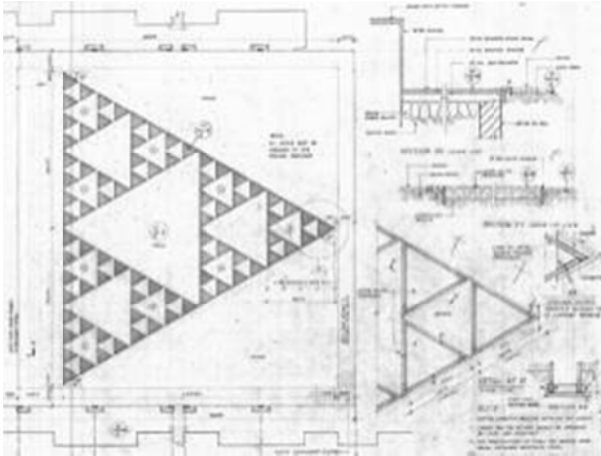
Dos projetos construídos, o primeiro projeto é de Peter Eisenman, *Frankfurt Biocentre* em 1987. Nele o arquiteto usa como forma a representação gráfica do DNA. Apesar de não existir fisicamente, o projeto teria condições de ser edificado (**Figura 44**). Eisenman não usa a GF neste projeto, mas o conceito de iteração. A tentativa do arquiteto de usar uma imagem significativa para a função do edifício é evidente, mas seu principal objetivo é usar o conceito de fractal como uma maneira de desestabilizar a geometria Euclidiana.

**Figura 44.** Frankfurt Biocentre.

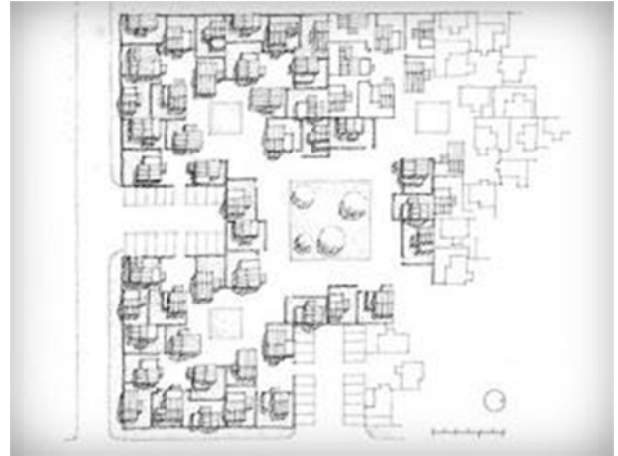


Fonte: Eisenman, 1987.

O segundo projeto é de Charles Correa, *Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics – IUCAA* (1993), que usa o triângulo de Sierpinski demarcado no piso de um dos pátios como um jardim (**Figura 45**). O projeto apresenta uma série de simbolismos cósmicos. O triângulo de Sierpinski usado como ornamentação de um jardim representa um símbolo da geometria que é significativa para os usuários do edifício. Além deste projeto, Charles Correa também utiliza a GF de maneira muito interessante no projeto de habitação social para Belapur (**Figura 46**).

**Figura 45.** Projeto do IUCAA.

Fonte: Correa, 1993.

**Figura 46.** Projeto Belapur.

Fonte: Correa, 1993.

O terceiro projeto, de Aldo e Hannie van Eyck, *European Space and Technology Centre - ESTEC*, usa o fractal dragão como elemento estruturador dos espaços (**Figura 47**). Os processos usados na criação das formas foram transcrição, replicação e translação. Os arquitetos usam o fractal “*aligned with scientific definitions of complexity and uses of fractal geometry to mediate between humanity and nature*” (OSTWALD, 2009:250).

**Figura 47.** Maquete física do ESTEC.

Fonte: Eyck, 1987.

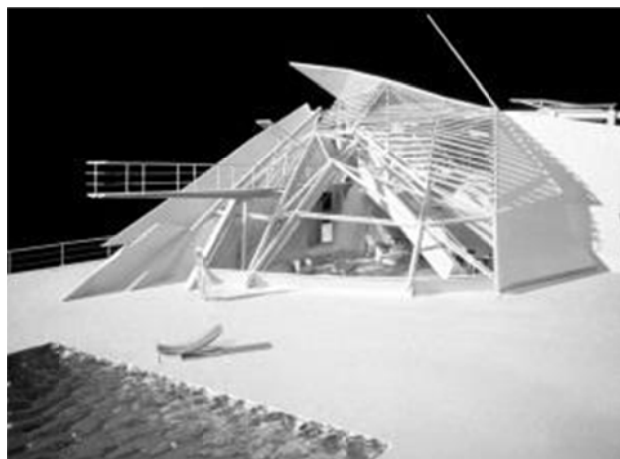
Ostwald (*ibid.*) ainda categoriza alguns arquitetos conforme a teoria que explica seus projetos e os resultados. A primeira categoria é de arquitetos que, apesar de usarem a ciência da complexidade, apresentam uma teoria do projeto (*espoused theory*) desconexa da teoria da complexidade (*expressed theory*). Esses arquitetos não fazem uma ponte entre a teoria descrita e a forma final do projeto. Aks Runo, Asymptote, Raoul Bunschoten, Jo Coenen, Carlos Ferrater, Peter Fluck, Morphosis, Philippe Samyn, Daniel B. H. Liebermann,

Pete Silver, Serge Salat e Françoise Labbé, Peter Kulka e Ulrich Königs e Ben van Berkel e Caroline Bos são os profissionais que usam fractais apenas em um ou dois projetos.

Ostwald (*ibid.*) procura compreender as motivações pelas quais os arquitetos se apoiam na teoria da complexidade e como se dá essa relação no projeto, mas não encontra uma fundamentação sólida nos projetos desses arquitetos. Outros arquitetos, no entanto, se destacam ao apropriar-se da complexidade com o propósito de explicação: Jo Coenem, Jennifer Taylor (analisando a arquitetura de Toyo Ito) e Toshio Nakamura (analisando a arquitetura de François DeMenil) são alguns exemplos.

A segunda categoria é de arquitetos que tentaram conectar a teoria do projeto com a teoria da complexidade. Exemplos desses arquitetos são Coop Himmelblau, Kazuo Shinohara, Peter Eisenman e Ushida Findlay. *“In all of these cases there is strong evidence to suggest that they have repeatedly, over an extended period of time, appropriated concepts from Complexity Science”* (IBID.:291). A apropriação da complexidade por Coop Himmelblau fica evidente nos textos dos críticos de arquitetura e não no discurso dos arquitetos. Um dos projetos que mostra o método de trabalho desse escritório se chama *Open House* (Figura 48). O método consiste em fazer um croqui intuitivo inicial do projeto chamado *“psychogram”*, com o objetivo de manifestar o desejo subconsciente do arquiteto para aquele projeto. A condição inicial do projeto é o caos no qual os arquitetos procuram as regras para torná-lo possível. Alguns outros projetos são explicados por Ostwald com o intuito de perceber no discurso dos arquitetos a coerência na utilização dos fractais. Ostwald (*ibid.*:352) finaliza seu livro com a seguinte colocação: *“[w]hen fractal geometry is appropriated for analysis or investigation, or when it is used symbolically or rhetorically, the resulting fractal architecture is frequently more exciting and inventive”*.

**Figura 48.** *Open House.*



Fonte: Bonner, 2013.

Salingaros é autor de diversos trabalhos sobre as características fractais da arquitetura. Destaca-se seu livro *Twelve lectures on architecture: algorithmic sustainable design*, de 2010, no qual trata da hierarquia, padrões e escalas na arquitetura. O autor utiliza a complexidade de formas e a GF como argumento para uma arquitetura sustentável. No primeiro capítulo, *Complexity and Scaling*, ele explica a recursão e o uso de algoritmos. Salingaros (2010:17) afirma que em arquitetura recorreremos à memória para dar solução a problemas, no entanto “*an algorithm makes us independent of memory, hence more creative*”. Um conceito enfatizado por ele é o uso de proporções e a utilização de hierarquia em diversas escalas no projeto, porém de forma ordenada.

Segundo Salingaros (*ibid.*) os fractais podem ser de dois tipos: perfurados (esponjas, peneiras) e acretivos (corais, rios). Para o autor a arquitetura vernacular e de períodos como o barroco e gótico são exemplos de como utilizar conceitos fractais. Três processos são necessários para criar uma hierarquia de escalas ou a subdivisão fractal (*IBID.:44*): *perforation* (janelas, portas, arcadas), *bending* (partindo de linhas retas criar uma estrutura em escalas menores), e *folding* (pilares, estrias em colunas, detalhes que remetem ao todo em diversas escalas). Em seu livro ele evidencia que os arquitetos devem exercitar o conhecimento matemático da complexidade. “*These exercises prepare us to understand the real-life problems of architectural design*” (*IBID.:80*).

James Harris (2012) apresenta em seu livro (*Fractal Architecture*) uma série de projetos com GF. Os projetos exploram formas autossimilares e comportamentos recursivos para gerar fachadas e volumetrias. Gerados a partir de *scriptings* os edifícios se inspiram em exemplos da arquitetura modernista. Harris (*ibid.:15*) traz uma importante observação a respeito do uso de fractais na arquitetura:

*“One principal misunderstanding of fractals and their application to architecture is that the simple repetition of forms at different scales suffices to make a design fractal and therefore provide it with an elusive organic quality”.*

Harris elabora comparações da GF com a teoria da Gestalt. Ele também se apoia na arquitetura orgânica de Frank Lloyd Wright como argumento para considerar os fractais no projeto. Harris (*ibid.:249*) explica:

*“In compositions generated by fractal geometry, as with natural forms, the essential property that emerges is an organic quality. The separate elements by themselves do not possess this quality, but in the process of self-organization, they relate to other entities in an integrated manner and form a unit at the next level of organization that interrelates with other units on that level in a similar manner, forming an integrated unit on that level. This process continues up*

*through the levels of organization until an organic whole emerges which is more than the sum of elements”.*

No ano de 2004 ocorreu o evento *First International Conference on Fractal Foundations for 21st Century Architecture and Environmental Design*<sup>8</sup>. Além dos palestrantes relacionados na **Tabela 5**, o próprio Mandelbrot contribuiu para o evento através de uma participação virtual. As diversas palestras e artigos publicados contaram com a participação de pesquisadores como Salingaros, Moisset e Bovill cuja contribuição para o campo de arquitetura e fractais é expressiva. Infelizmente o evento não teve continuidade, mas deixou um marco no estudo da GF na arquitetura.

**Tabela 5.** Palestrantes da Conferência Inphiniart.

<b>Profissional</b>	<b>Palestra</b>
<i>Architect</i> Maria Antonia Castro	<i>Fractal fundamentals of beauty and their application to design</i>
<i>Physicist</i> Giuseppe Caglioti	<i>Fractals, self-organization and creativity</i>
<i>Physicist</i> Nikos Salingaros	<i>Architecture and natural laws</i>
<i>Architect</i> Paul Coates	<i>Fractal decomposition in architecture: some recent work developed at CECA (Centre for Evolutionary Computing in Architecture)</i>
<i>Architect</i> Andrew Crompton	<i>The fractal nature of everyday space and its importance for architecture</i>
<i>Architect</i> Carl Bovill	<i>Fractal geometry in architecture and design</i>
<i>Ethnomathematician</i> Ron Eglash	<i>Fractals in African material culture: applications to design and education</i>
<i>Architects</i> Javier Pioz and Rosa Cervera	<i>Fractal geometry and bio-structures</i>
<i>Psychologist</i> James Wise	<i>A perspective on fractals in environmental design from cognitive and environmental psychology</i>
<i>Visual cognitive scientist</i> Gert van Tonder	<i>Fractal potential of emptiness: the Japanese garden</i>
<i>Designer</i> Laura Deubler-Mercurio	<i>Bringing fractal nature into the patient area to promote wellbeing.</i>
<i>Architect</i> Inés Moisset	<i>Fractals in design: creative experiences</i>

Fonte: Inphiniart, 2004.

<sup>8</sup> Descrição do evento: *INPHINIART is made out of professionals of different disciplines such as architecture, engineering and communication, who are devoted to contemporary artistic design. Inphini Art aims to use fractal geometry to encourage all design activities that will create natural, beautiful, functional and ecological objects and spaces, in order to build the most appropriate background for the human being designs that fulfill both material and psychological needs.*

## 4.2 Aplicações contemporâneas

Esta seção trata das aplicações de fractais na arquitetura contemporânea. Os projetos apresentam padrões fractais recursivos e foram classificados conforme o **Quadro 1** (p. 68), apresentado anteriormente: ornamento, estrutura, controle climático e volumetria. O ornamento foi classificado nesta tese em três tipos: *branching*, que é a geração de ramificações; *recursive surface subdivision*, que é a subdivisão de superfícies com objetos semelhantes; ou clássico, quando um fractal clássico é utilizado no projeto, como o Triângulo de Sierpinski.

Não foram encontrados exemplos de geração de fractais em planta baixa. Em alguns projetos havia informação sobre as regras utilizadas para geração dos fractais; naqueles em que não havia informação, as regras não estão presentes.

Diversos pesquisadores acreditam que os fractais tem algo a contribuir para a arquitetura. Harris (2012:287) afirma que o uso de fractais na arquitetura pode ir além da criação de volumetrias, ou padrões geométricos.

*“Fractal geometry can be used to generate façades, individual façade panels, and ornament. Although as you reduce the scope where fractal geometry is utilized from form to façade to façade panel and then to ornament, the cognitive effect is transformed depending on its context, and the forms that incorporate the elements of fractal geometry still retain their inherent appeal”.*

Já Ibrahim e Krawczyk (2006), explicam:

*“The concept of utilizing the fractals, as a form investigating technique can be useful if they are rationalized so that they relate to architectural elements like axes or masses, some architecturally related organizational scheme”.*

Woodburry (2010), no livro *Elements of parametric design*, escreveu um capítulo dedicado à recursão e explica quando, porque e como usar a recursão no projeto.

*“When: Hierarchy as design strategy conflates wholes and parts. The parts are transformed versions of the whole. This naturally leads to a hierarchical information structure of layers, where the properties of a layer are based on those of the layer immediately superior to it. Recursive algorithms are natural traversers of such hierarchical structures. Use this pattern when you are working with hierarchy in design.*

*Why: Some complex models such as spirals, branching structures or space-filing curves can be elegantly represented with a recursive function. In fact, it is often so difficult to represent such structures non-recursively that designers give up and try something easier. A recursive function typically takes a motif and a replication rule and calls itself on the copies of the motif that the rule generates. A word of*

*warning though---recursive algorithms are often hard to understand in the abstract. We humans are not good at extrapolating a pattern from a motif and a replication rule. Another word of warning. Recursive algorithms as update methods can be slow. Typically, limiting the depth of the recursion is the only way to maintain an adequate interactive update rate.*

*How: Recursion requires a motif (a geometric object) and a replication rule. The simplest rule is simply a coordinate system with some combination of translation, rotation, scale and shear. Other more complex rules are possible, including ones that change or abstract the motif itself. The body of a recursive function uses the replication rule to generate a collection of clones of the motif. It then calls itself on each clone, typically (but not necessarily) using the same replication rule. So, in each step, the recursive function takes an existing motif, replicates it and calls itself”.*

Carlson e Woodburry (1990:10) afirmam:

*“[...] the recursive application of a replication rule to a simple motif may give rise to unexpectedly intricate forms. In all but the simplest instances, the human mind is not equipped to predict the outcome of such recursion”.*

Por isso, o uso de computadores pode ser uma ferramenta que amplia a capacidade do cérebro humano como coloca Terzidis (2006). Salingaros (2007:84) faz um comentário em favor do uso de fractais na arquitetura e por consequência exprime a importância do ornamento para a coerência entre as diversas escalas:

*“Natural structures have this (essentially fractal) property. If a man-made form lacks ordered structure on one or more obvious scales, it is perceived by human beings as being visually incoherent, and consequently as alien to our conception of the world (which is based on visual consistency). A building's visible substructure on the range of scales from 1 mm to 1m has been achieved in the past through traditional ornament and detail”.*

Por outro lado, Lorenz (2014:668) afirma: “[n]evertheless, due to the process of building, the intention of the architect and material restrictions, fractal characteristics are, in any case, restricted to a certain range of scales”. Taylor (2006:249) acredita haver dois caminhos para o uso da GF em arquitetura:

*“Is it practical to create buildings with a fractal appearance? One approach is to construct the building's framework based on fractal geometry. A less radical approach is to use a Euclidean shape for the building's basic structure and incorporate fractals into the design using, for example, paint, lighting or attached structures”.*

Taylor adota a abordagem simples para realizar seus experimentos (influência de fractais na diminuição do stress); uma imagem com dimensão fractal aplicada em uma superfície serve para verificar o stress de uma pessoa ao realizar uma atividade.



E por fim, Harris (2012:3) que explica sua visão do uso de fractais na arquitetura:

*“Fractal architecture is an innovative direction in the design and development of architectural form, rooted in the principles that govern the geometry of natural form. Fractal geometry is a recursive mathematical derivation of form that possesses a self-similar structure at various levels of scale or detail and, if the number of recursions is large, results in a dense structure that challenges dimensional qualification”.*

#### 4.2.1 Projetos

##### 1. Ashton, Raggatt e McDougall (ARM)

RMIT Storey Hall, 1996 – Melbourne – Austrália.

- Ornamento (*recursive surface subdivision*)

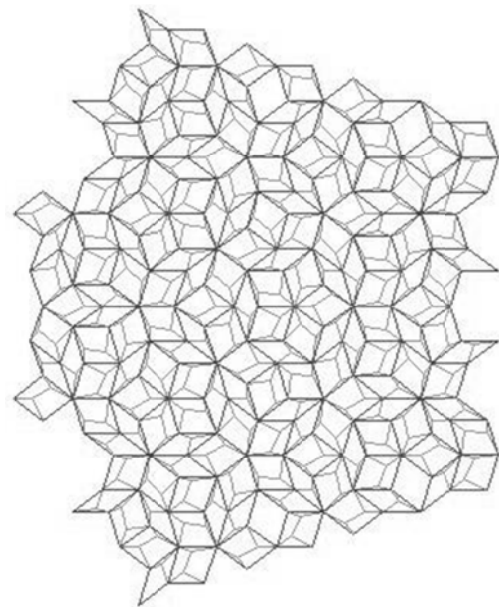
Este projeto para um auditório e salas de aula do RMIT consiste em edifício projetado com formas complexas na fachada e interior (**Figura 49**). As formas são baseadas nos ladrilhos irregulares de Roger Penrose que nunca se repetem exatamente e são sempre autossimilares. Os ladrilhos de Penrose (**Figura 50**) são gerados a partir de um processo recursivo.

**Figura 49.** Storey Hall



Fonte: ARM, s.d.

**Figura 50.** Ladrilhos de Penrose.



Fonte: Melik, s.d.

##### 2. Daniel Libeskind

Museu Victoria e Albert, 1996 – Londres – Inglaterra.

- Ornamento (*recursive surface subdivision*)

O projeto (**Figura 51**) é composto a partir de um atrator caótico em forma de espiral, revestido por peças que o arquiteto denomina de ‘*fractile*’ (ladrilho fractal) de cerâmica, cuja irregularidade dá um resultado final semelhante a uma superfície cristalizada. O ‘*fractile*’ (**Figura 52**) de Libeskind é produzido com regras computacionais para o preenchimento de superfícies, as formas semelhantes a “L” e “T” variam em dimensão e formato permitindo infinitas composições.

**Figura 51.** Projeto de extensão do Museu Victoria and Albert.



Fonte: Libeskind, s.d.

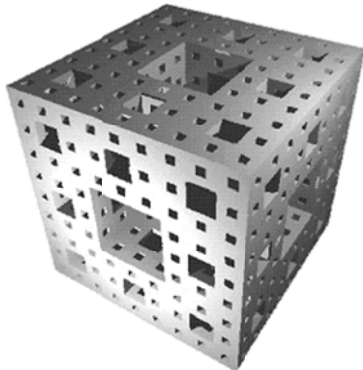
### 3. Steven Holl

Sarphatistraat Offices, 1996 - Amsterdam - Holanda

- Volumetria

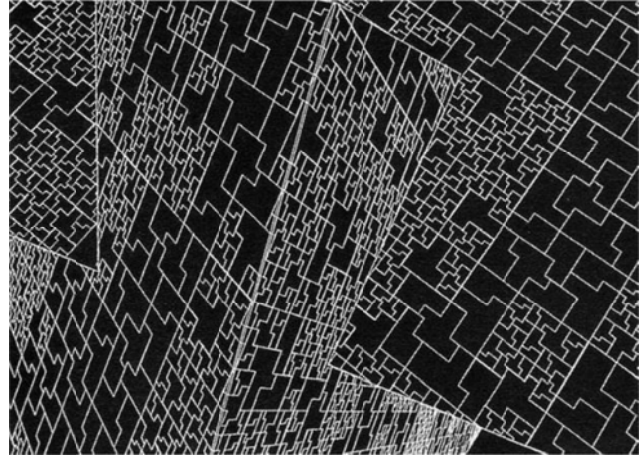
O arquiteto cria este prédio anexo em forma de uma esponja: poroso. Holl (2000) explica a ideia: "[t]he layers of perforated screens are developed in three dimensions, analogous to the "Menger Sponge" principle of openings that are continuously cut in planes and constantly approaching zero volume". Deixando claro que não é possível construir um fractal *per se*, e que Holl, então, está usando apenas um conceito da GF a esponja de Menger (Figura 53), em duas ou três iterações (Figura 54).

**Figura 53.** Esponja de Menger.



Fonte: Bourke, s.d.

**Figura 52.** Fractile.



Fonte: Moisset, 2003.

**Figura 54.** Escritórios Sarphatistraat.



Fonte: Warchol, 2000.

#### 4. Lab Architecture Studio

Federation Square, 1997 – Melbourne – Austrália

- Ornamento (*recursive surface subdivision*) Estrutura

O programa para o projeto é complexo, um grande espaço público para a reunião de pessoas, cinema, galerias, salas para eventos e conferências. A ideia dos arquitetos para as fachadas foi “coerência e diferença” (BATES, 2008:163), pensando na maneira de manter uma coerência nas fachadas, mas evidenciando a diferença entre os programas internos por meio da composição (Figura 55, Figura 56). As fachadas receberam um revestimento composto por zinco, vidro e uma pedra chamada de *sandstone*, cortada em formato de triângulo, compondo cinco peças que constroem um painel. Um mega-painel é formado por cinco painéis (Figura 57, Figura 58).

Figura 55. Estrutura da fachada.

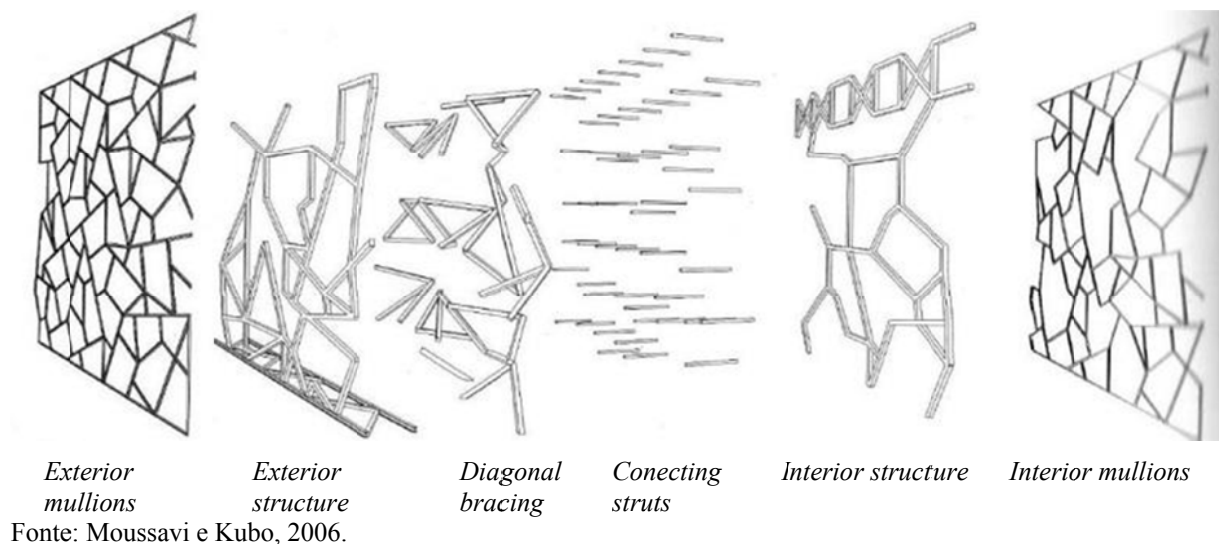
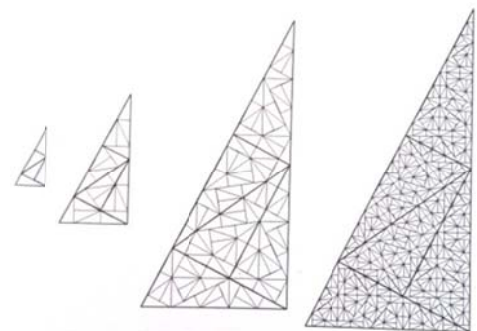


Figura 56. Auditório Federation Square.



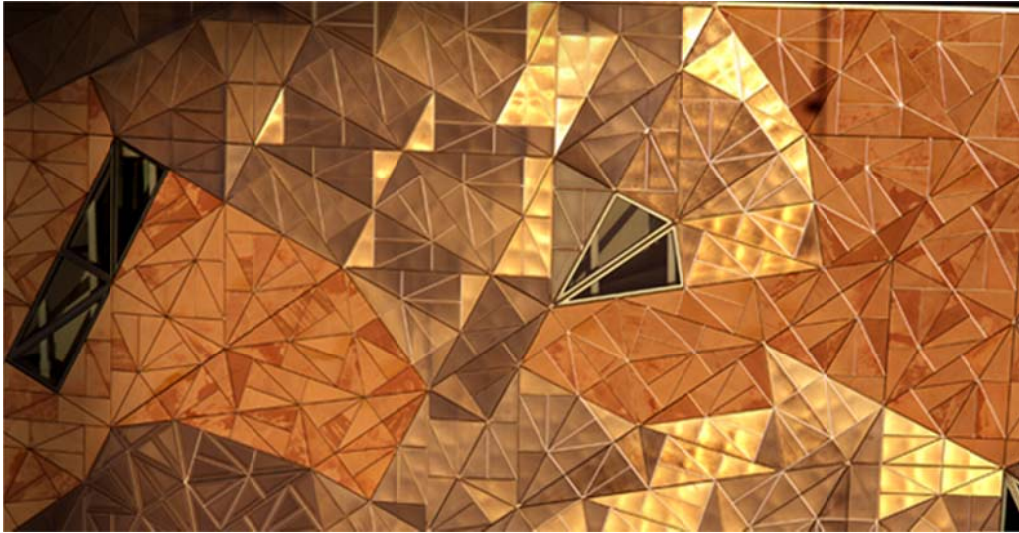
Fonte: Federation Square, s.d.

Figura 57. Geração dos mega-painéis.



Fonte: Kolarevic, Klinger, 2008.



**Figura 58.** Detalhe da fachada Federation Square.

Fonte: Federation Square, s.d.

### 5. Miguel Chevalier

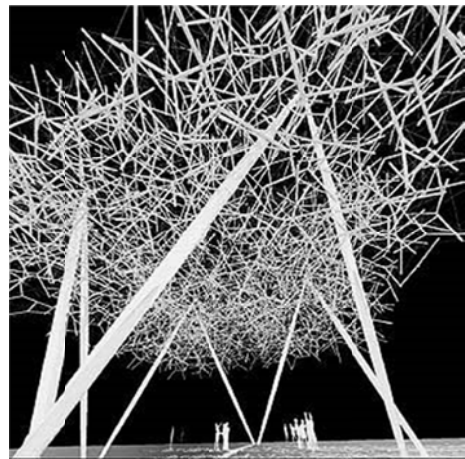
Fractal Cloud, 2000 – Marselha – França

- Ornamento (*branching*) Estrutura

O arquiteto propõe um elemento escultórico para uma praça chamado de Nuvem Fractal, medindo vinte metros por vinte e oito metros. A obra tem a forma de uma superestrutura flutuante formada por uma rede de cabos de fibra ótica disposta em crescimento fractal (Figura 59, Figura 60).

**Figura 59.** Projeto da nuvem fractal.

Fonte: Chevalier, 2006.

**Figura 60.** Maquete do projeto.

Fonte: Chevalier, 2006.

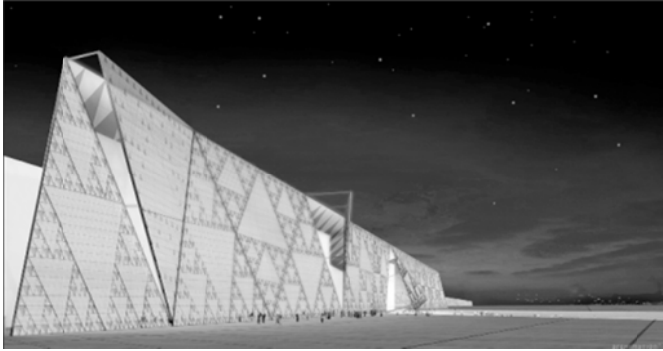
### 6. Heneghan Peng

Grand Egyptian Museum, 2003 – Cairo – Egito

Ornamento (clássico)

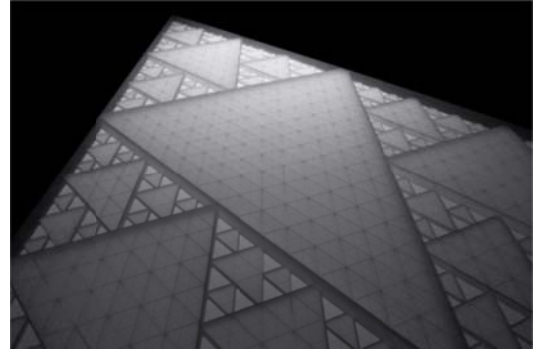
A fachada do museu foi elaborada com um padrão fractal em até seis iterações (triângulo de Sierpinski) (**Figura 61**, **Figura 62**). O material proposto é uma pedra transluzente. A proposta permite a visualização de uma grande diferença de nível do terreno e também das pirâmides egípcias que fazem parte do entorno.

**Figura 61.** Fachada Museu Egípcio, Heneghan Peng.



Fonte: Heneghan Peng, 2003.

**Figura 62.** Detalhe da fachada, Heneghan Peng.



Fonte: Heneghan Peng, 2003.

## 7. Michael Silver

Liquid Crystal Glass House, 2003 – Malibu – EUA

- Volumetria

Segundo Wayda (2004), Michael Silver busca neste projeto uma conexão visual entre a linguagem espacial e a matemática. Ao assistir a um curso de GF o arquiteto cria padrões fractais nas paredes na casa de vidro, mas ainda insatisfeito com o resultado. Mandelbrot explicou para Silver que simplesmente não havia painéis de vidro suficientes para se observar algum padrão. Contudo, fazer os painéis menores e em maior quantidade não seria viável economicamente.

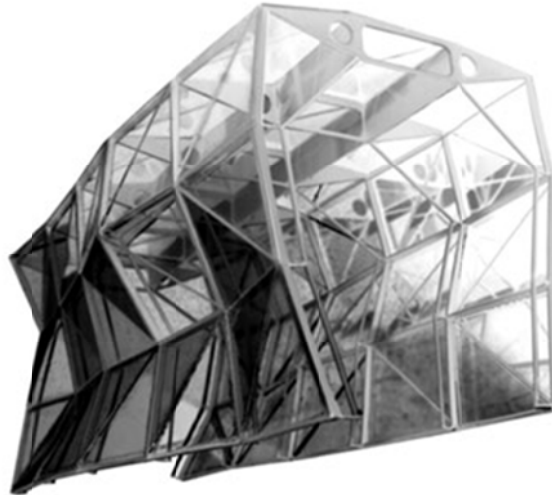
Então, ao repensar o projeto, aplicou o conceito de autômato celular<sup>9</sup> para construir um padrão fractal em uma parede com os tijolos agindo como pixels. Como as regras são mais simples Silver pode controlar melhor a resolução do problema. As paredes então seriam uma coleção de células que poderiam ser opacas de tijolo ou transparentes de vidro, e como a proximidade de uma célula e outra poderia ser controlada.

A primeira simulação do projeto, apesar de atender a requisitos estéticos, era dominada por padrões randômicos que não se relacionavam como as funções internas do edifício. Ao mudar as regras gradualmente e as condições iniciais ele começou a evoluir no projeto até encontrar um conjunto de regras que produziram uma estrutura funcional, de

<sup>9</sup>Autômato celular consiste de uma malha regular de células com um número finito de estados (ligada ou desligada). Uma regra fixa (função) determina o estado de cada célula e suas células vizinhas.

complexidade variada (Figura 63). Apenas as regras do padrão foram modificadas neste processo.

**Figura 63.** *Liquid crystal glass house.*



Fonte: Wayda, 2004.

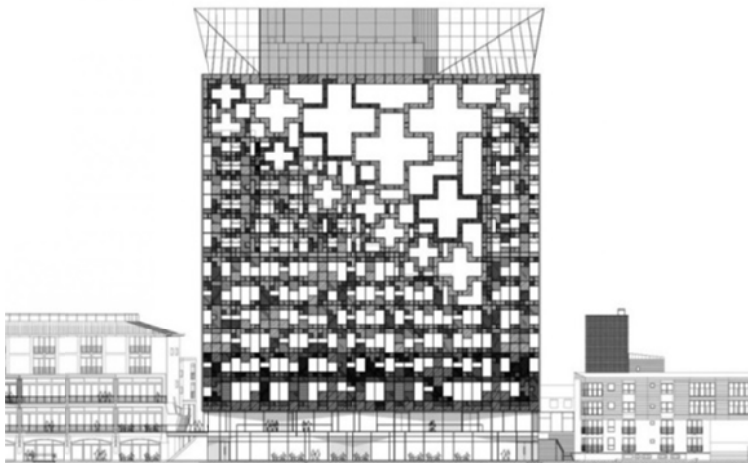
## 8. Make

The Cube, 2005 – Birmingham – Inglaterra

- Ornamento (*recursive surface subdivision*) Estrutura

Este edifício de uso misto: residencial, hotel, restaurante, garagens está construído em uma área industrial de Birmingham. Os arquitetos subdividiram a fachada em aberturas em forma de +, com aberturas maiores na parte onde não há programa (Figura 64, Figura 65). Contudo o edifício como um todo não expressa o desenho da fachada.

**Figura 64.** Projeto da fachada *The Cube*.



Fonte: Make, 2012.

**Figura 65.** *The Cube*.



Fonte: Make, 2012.



## 9. Serie Architects

Restaurante Tote, 2006 – Mumbai – Índia

- Ornamento (*branching*) Estrutura

Este projeto utiliza o crescimento fractal L-system para produzir uma estrutura. A semelhança com árvores foi a ideia principal do projeto. Diversas opções foram elaboradas na etapa de criação do projeto, investigando como essa estrutura poderia funcionar (Figura 66, Figura 67).

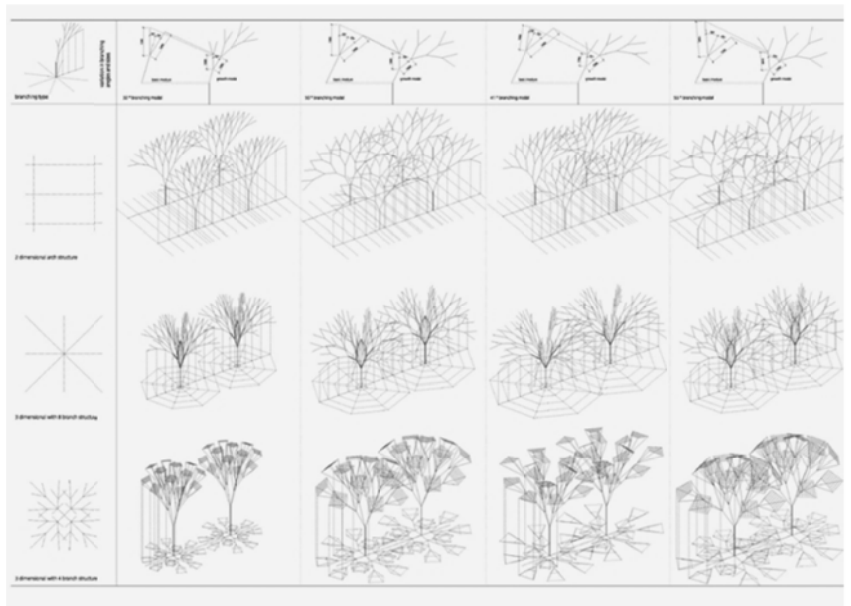
Figura 66. Estrutura Restaurante

Tote.



Fonte: Petit, 2009.

Figura 67. Processo generativo.



Fonte: Serie, 2009.

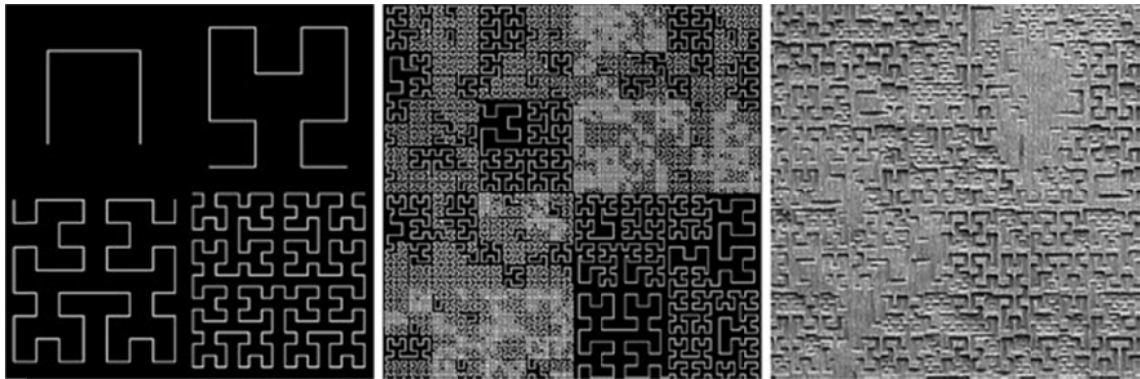
## 10. Russel Loveridge e Kai Strehlke

*Programmed surfaces*, 2006 – Zurique – Suíça

- Ornamento (clássico)

Loveridge e Strehlke examinam o uso de tecnologias, especificamente a aplicação em CAAD e CAAM de padrões, texturas e detalhes ornamentais em arquitetura. O objetivo desta pesquisa é explorar o novo ornamento que se surge com a aplicação de novas tecnologias de projeto. Segundo os autores, que usaram programação para gerar superfícies ornamentadas e fabricação com máquinas CNC, isto é “*a novel approach to the idea of contemporary ornament*” (LOVERIDGE, STREHLKE, 2006:38). A Figura 68 mostra um dos experimentos com a curva de Hilbert, um tipo de curva que preenche o espaço.



**Figura 68.** Curva de Hilbert, iterações e modelo usinado.

Fractal Curva de Hilbert

Experimentações

Superfície usinada com CNC

Fonte: Loveridge, Strehlke, 2006.

Loveridge e Strehlke (*ibid.*:49) concluem:

*“The benefits of this work lie in the ability to generate ornament efficiently [...]. Although this research began with investigations at the small scale, the principles and programming were easily adapted to a larger building scale, specifically for customized building façade panels”.*

### 11. René van Zuuk Architekten

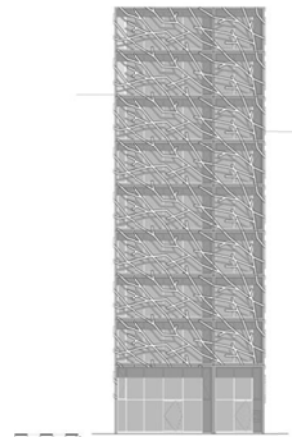
Zilverparkkade D, 2006 – Lelystad – Holanda

- Ornamento (*branching*)

As fachadas são recobertas com um padrão de galhos feitos de elementos de concreto pré-fabricado (**Figura 69**). O desenho se originou de um estudo de padrões fractais. A ideia dos arquitetos é evitar a repetição de elementos para não criar um desenho muito óbvio, mas observa-se claramente que não há variação nos andares (**Figura 70**). A variação poderia ser facilmente gerada com um SG.

**Figura 69.** Zilverparkkade.

Fonte: Zuuk, 2009.

**Figura 70.** Desenho da fachada.

Fonte: Zuuk, 2009.

## 12. Simon Whittle

A.A. School Pavilion, 2006 – Londres – Inglaterra

- Ornamento (*branching*) Estrutura Volumetria

Todo ano a *Architectural Association School* promove a construção de um pavilhão pelos próprios alunos. Uma das aulas sobre autossimilaridade e GF influenciou o projeto de Simon Whittle que foi construído pela turma (**Figura 71**). Os alunos produzem todas as plantas necessárias para a execução do projeto, e neste exemplo, eles mesmos fazem o trabalho de marcenaria. Em seguida, trabalham em conjunto na montagem do pavilhão. O projeto é uma construção de formas autossimilares em diferentes escalas, construídas com encaixes.

**Figura 71.** Estrutura Fractal – Pavilhão A.A. School.



Fonte: Ainley, 2006.

## 13. Pierluigi Piu

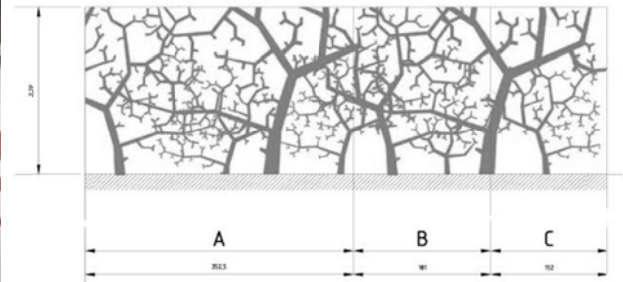
Restaurante Olivomare, 2007 – Londres – Inglaterra

Ornamento (*branching*)

O oceano foi a inspiração para a arquitetura do restaurante. Uma composição bidimensional de L-systems, semelhantes a corais marinhos, ornamenta algumas das paredes (**Figura 72, Figura 73**).

**Figura 72.** Restaurante Olivomare.

Fonte: Piu, 2009.

**Figura 73.** Planificação das paredes.

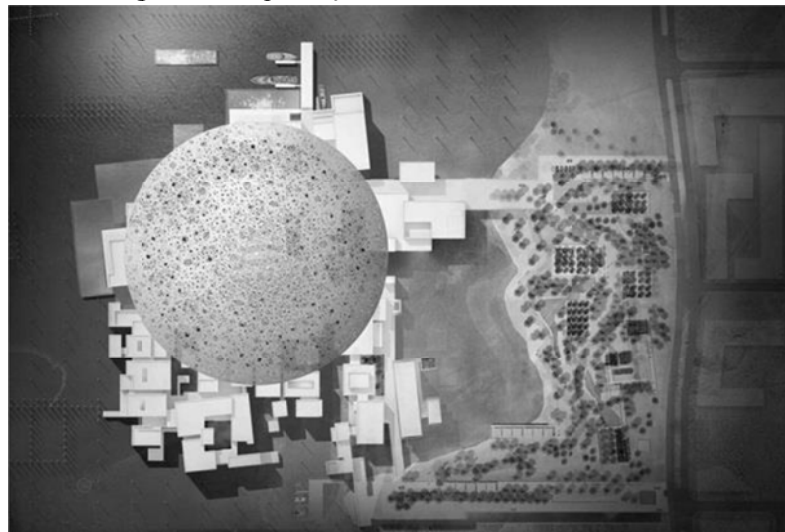
Fonte: Piu, 2009.

#### 14. Jean Nouvel

Louvre Abu Dhabi, 2007 – Abu Dhabi – Emirados Árabes

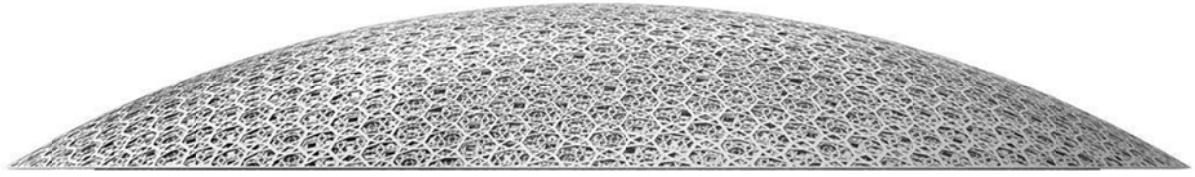
- Ornamento (*recursive surface subdivision*) Estrutura Controle Climático

Um domus de 180 metros de diâmetro cobre o museu apoiado em apenas 4 pontos. A ideia é a de criar um microclima a partir da cobertura perfurada em um padrão autossemelhante com uma organização fractal. As diferentes camadas do domus e a possibilidade de rotação das camadas justapostas permitiram aos arquitetos estudar efeitos de iluminação e controle solar (**Figura 74**, **Figura 75**).

**Figura 74.** Implantação/cobertura Louvre Abu Dhabi.

Fonte: Furuto, 2012.

**Figura 75.** Domus Louvre Abu Dhabi.



Fonte: Furuto, 2012.

## 15. MAPT

Indústrias Hus, 2008 – Dinamarca

- Ornamento (*branching*) Estrutura

O projeto utiliza o crescimento em árvore (L-system) para o desenho da estrutura do edifício (Figura 76). A proposta incorpora um conjunto de edificações existentes e valoriza a transparência da edificação, buscando a sensação de caminhar na copa de uma árvore.

**Figura 76.** Estrutura Indústrias Hus.



Fonte: MAPT, 2008.

## 16. Serero

Auditório Saint Cyprien, 2008 – França

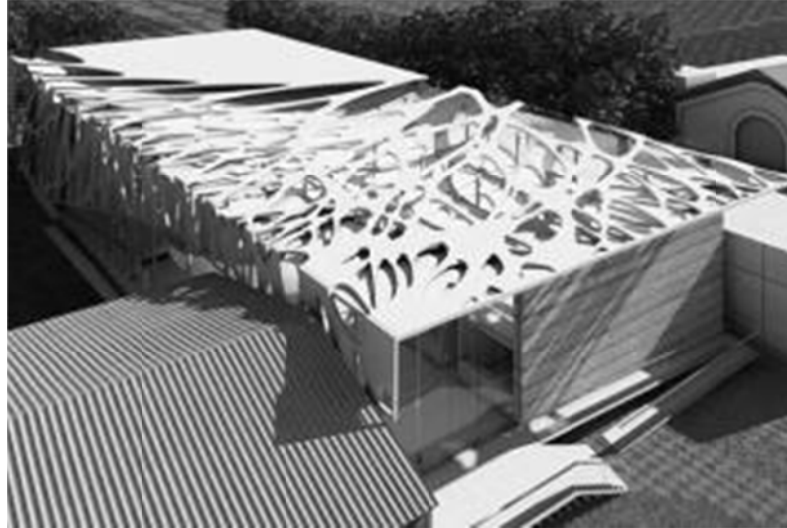
- Ornamento (*branching*) Estrutura Controle Climático

O projeto inicia com uma série de experimentações de formas L-systems com diferentes ângulos, buscando silhuetas de folhas e sombras (Figura 77, Figura 78). A complexidade do exterior se reflete no interior, com o objetivo de melhorar a qualidade acústica do auditório. Além disso, possibilita um sistema de ventilação passiva. A casca vazada cria um jogo de luz e sombra onde a cobertura abaixo é transparente. Esse escritório



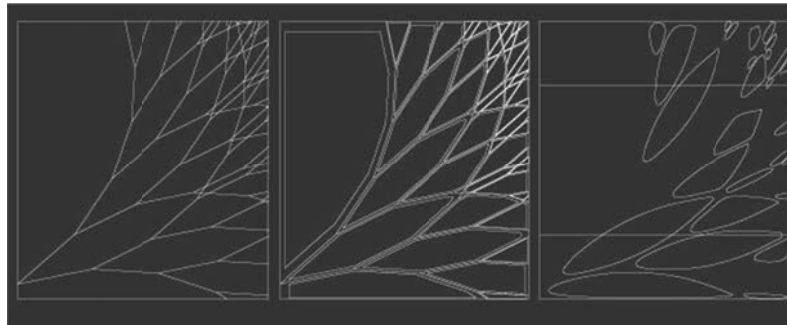
projetou diversos edifícios com inspiração em formas naturais usando a GF, sendo este o mais significativo.

**Figura 77.** Auditório Saint Cyprien.



Fonte: Serero, 2007.

**Figura 78.** Processo generativo Saint Cyprien.



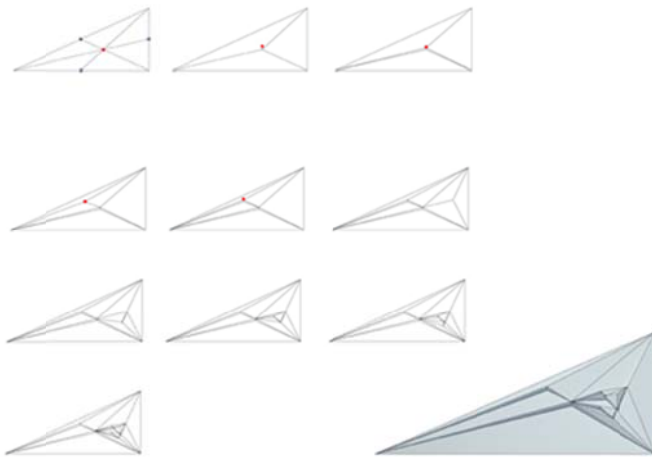
Fonte: Serero, 2007.

## 17. HDD\_Fun

Embedded Project, 2009 – Shanghai – China

- Ornamento (*recursive surface subdivision*) Volumetria

Este pavilhão temporário foi elaborado com um SG que subdivide a superfície triangular recursivamente em um padrão fractal. A cada iteração o plano em que se encontra é alterado perpendicularmente em 12 cm para criar o volume/dobra. O resultado é uma espécie de origami (**Figura 79**, **Figura 80**).

**Figura 79.** Processo generativo do projeto.

Fonte: Wang, Wang, 2009.

**Figura 80.** Fachada *Embedded Project*.

Fonte: Wang, Wang, 2009.

## 18. CNH Arquitetos

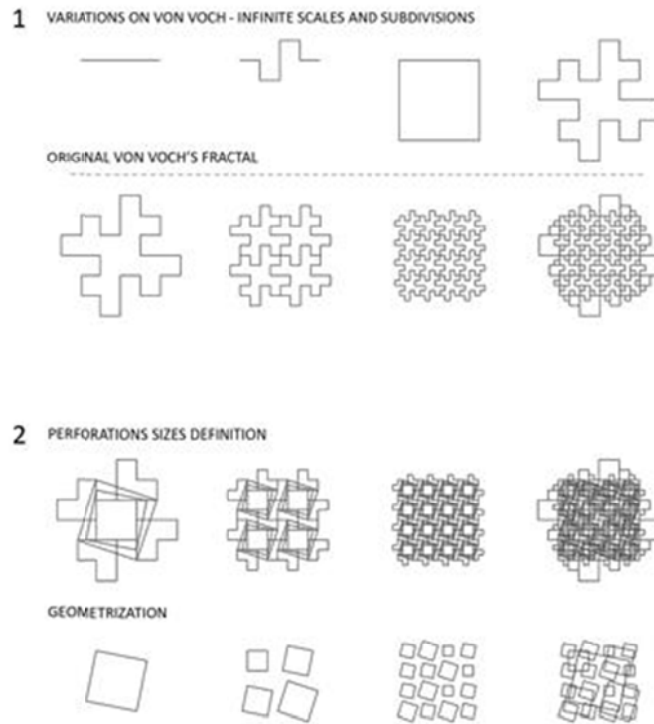
Museu exploratório de Ciências, 2009 – Campinas – Brasil

- Ornamento (*recursive surface subdivision*) Controle Climático

Os arquitetos CNH, hoje Corsi Hirano, exploram fractais lineares para a composição em painéis perfurados (Figura 81). As aberturas nos painéis na fachada permitem a passagem da luz em alguns locais específicos. As variações do desenho foram estudadas com a curva de Minkowski e não de Koch como descrito na Figura 82.

**Figura 81.** Fachada Museu Exploratório de Ciências.

Fonte: Corsi Hirano, 2009.

**Figura 82.** Processo Generativo.

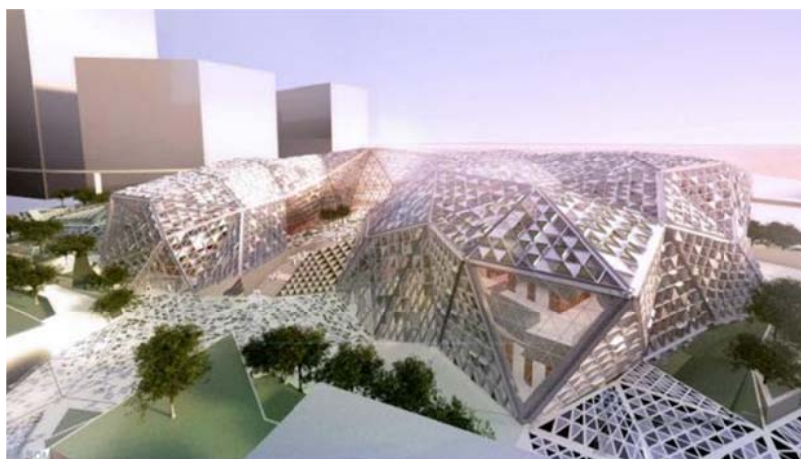
Fonte: Corsi Hirano, 2009.

## 19. SOM

KAFD Conference Center, 2010 – Riyadh – Arábia Saudita

- Ornamento (clássico) Estrutura Controle Climático

O triângulo de Sierpinski recobre algumas faces do projeto e com um conjunto de tecnologias ajuda na ventilação do ambiente, controle de iluminação (vidro eletrocromático), e captação de energia solar (**Figura 83**).

**Figura 83.** Projeto do edifício KAFD.

Fonte: SOM, 2012.

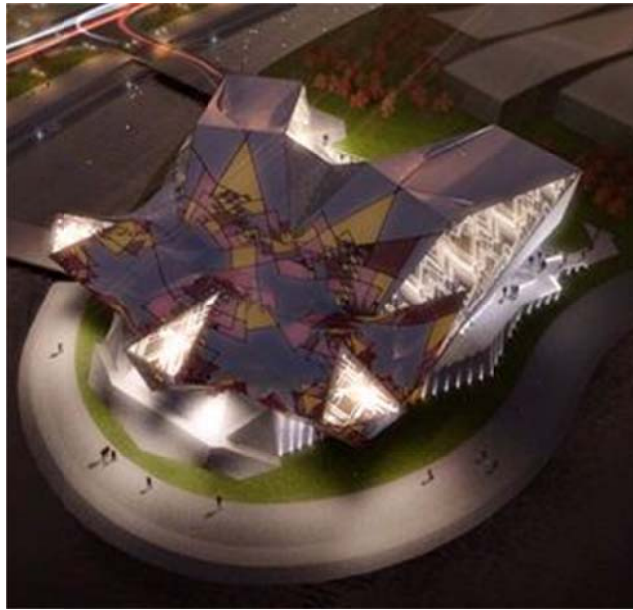
## 20. PATTERNS

Busan Opera House, 2011 – Coreia do Sul

- Ornamento (*recursive surface subdivision*) Controle Climático

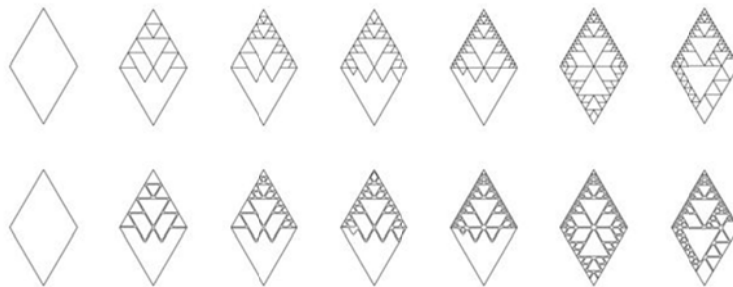
Essa proposta para o concurso da ópera de Busan não foi a vencedora. Os arquitetos criaram um padrão de iterações para ser empregado na divisão de uma superfície irregular que recobre o edifício (Figura 84, Figura 85).

**Figura 84.** Proposta para o concurso Busan Ópera.



Fonte: Patterns, 2011.

**Figura 85.** Processo generativo para a cobertura.



Fonte: Patterns, 2011.

## 21. Serge Salat

Beyond infinity, 2011 – Exposição – China

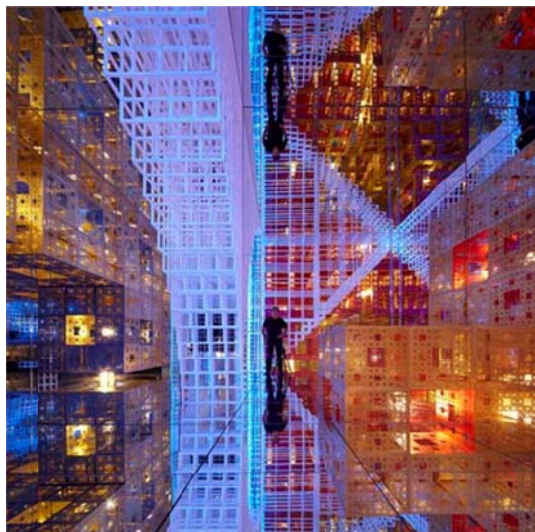
- Ornamento (clássico)

Esta instalação do artista francês Serge Salat, usa espelhos e iluminação em conjunto com treliças de madeira e painéis de metal perfurados e espalhados pelo ambiente



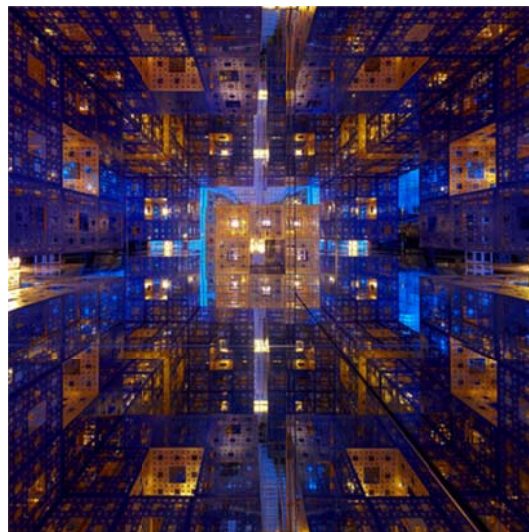
para criar a ilusão de infinito (**Figura 86**, **Figura 87**). O fractal utilizado foi a Esponja de Menger.

**Figura 86.** Escala do projeto Beyond infinity.



Fonte: Frearson, 2011.

**Figura 87.** Beyond infinity.



Fonte: Frearson, 2011.

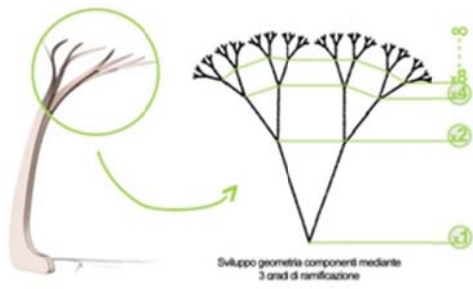
## 22. WoodLab – Politecnico di Torino

Fractal Forest, 2012 – Milão – Itália

- Ornamento (*branching*) Estrutura

Este projeto foi financiado por uma empresa de madeira *poplar*, usando algoritmos e fractais o grupo realizou o projeto para uma exposição em Milão. As ferramentas utilizadas para o projeto foram Rhino, Grasshopper e Python e máquina de corte CNC. O projeto foi elaborado na universidade como parte de uma pesquisa e atividade didática sobre novos métodos de projeto e fabricação. A **Figura 88** mostra o processo generativo que utiliza um algoritmo para divisão em ramos, e a imagem seguinte (**Figura 89**) apresenta o pavilhão montado.

**Figura 88.** Processo generativo *Fractal Forest*



Fonte: Iasef, 2013.

**Figura 89.** Projeto *Fractal Forest* construído.



Fonte: Iasef, 2013.

### 4.3 Revisão da Literatura

Esta seção apresenta a revisão da literatura realizada por meio de *mapping study*. Essa revisão foi realizada em dois momentos em janeiro de 2013, e atualizada em setembro de 2015. Dentro dos objetivos do *mapping study* estão a delimitação do problema da pesquisa e a busca de novas linhas de investigação. Procurou-se revisar os estudos primários relacionados à questão da pesquisa com o objetivo de sintetizar evidências relacionadas ao tema, encontrando lacunas a serem investigadas e explicar argumentos necessários para a compreensão das questões centrais.

#### **Primeira etapa.**

A definição das palavras-chave baseou-se no objetivo e na questão da pesquisa. Foram definidos os seguintes temas: “Arquitetura Fractal”, Métodos de Projeto e SG. Optou-se por realizar a pesquisa em inglês, utilizando o operador booleano ‘AND’ e intercalando as seguintes expressões (sempre entre aspas): *Fractal Architecture*, *Design Methods*, *Architectural Design*, *Generative System* e *Shape Grammar*. Não foi utilizado nenhum filtro de tempo, os artigos que apareceram são de 1980 a dezembro de 2012.

Um dos critérios de busca foi a utilização da palavra fractal sozinha, em vez de GF ou “arquitetura fractal”, para retornar um número maior de resultados. Optou-se pelas expressões fractal and “*design methods*”, fractal and “*architectural design*”, fractal and “*shape grammar*”, fractal and “*generative system*”. A busca pela palavra fractal nos periódicos específicos de arquitetura foi utilizada e trouxe resultados relacionados ao tema, diferente do que ocorre em bases de dados que trazem resultados de diversas áreas. As expressões “*fractal architecture*” and “*design methods*” e “*fractal architecture*” and “*shape grammar*” também foram pesquisadas, mas sem resultados retornados.

As bases de dados selecionadas para a pesquisa foram: Scopus, Web of Science, Google Acadêmico, Periódicos Capes, Jstor e Cumincad. Os periódicos identificados para a pesquisa foram: Architectural Design AD, Design Studies, Multi-science IJAC, Environment and Planning B e Automation in Construction. As expressões de busca utilizadas foram: A) fractal and “*design methods*”, B) fractal and “*architectural design*”, C) fractal and “*shape grammar*”, D) fractal and “*generative system*”, E) fractal. Todas as expressões foram pesquisadas nas bases e periódicos em Título, Palavras-chave e Resumo.

Na Tabela 6 evidencia-se a **reduzida quantidade de documentos relacionando fractais com SGs e gramáticas de formas** (linhas C e D), ou mesmo quando se relaciona

fractais com os métodos de projeto e projeto arquitetônico, que trazem mais resultados (linhas A e B), não ultrapassando o número de 24 documentos. Na **Tabela 7** os resultados tiveram uma quantidade de retornos maior que na **Tabela 6**. Considerando as bases de dados Web of Knowledge, Scopus e Jstor percebe-se uma variação semelhante à **Tabela 6**, com menos resultados nas linhas C e D e mais resultados nas linhas A e B. A base Cumincad trouxe resultados somente para a expressão fractal, porém os documentos são de grande relevância para a pesquisa. Os retornos do Google Acadêmico e Periódicos Capes foram analisados até a quinta página de resultados, sendo que ambas retornam 10 resultados por página. Os resultados dos Periódicos Capes ainda foram filtrados por uma das opções oferecidas pelo site: refinar resultados pelo tópico.

**Tabela 6.** Número de retornos nos periódicos científicos selecionados.

	<b>Architectural Design</b>	<b>Design Studies</b>	<b>Multi-science IJAC</b>	<b>Environment and Planning B</b>	<b>Automation in Construction</b>
A	10	11	11	2	11
B	24	8	13	2	9
C	2	5	3	1	2
D	5	3	6	0	6
E	24	12	13	28	13

A. fractal and “*design methods*”, B. fractal and “*architectural design*”, C. fractal and “*shape grammar*”,

D. fractal and “*generative system*”, E. fractal.

Fonte: Do autor, 2013.

**Tabela 7.** Número de retornos em base de dados.

	<b>Google Acadêmico</b>	<b>Cumincad</b>	<b>Web of Knowledge</b>	<b>Scopus</b>	<b>Jstor</b>	<b>Periódicos CAPES</b>
A	2030	0	12	38	12	153
B	2760	0	14	48	30	145
C	381	0	4	7	4	17
D	162	0	0	1	5	36
E	*	51	*	*	*	*

\* Palavra-chave não considerada nessa base de dados devido ao grande número de retornos. A. fractal and “*design methods*”, B. fractal and “*architectural design*”, C. fractal and “*shape grammar*”, D. fractal and “*generative system*”, E. fractal.

Fonte: Do autor, 2013.

Ao final do *mapping study* 151 artigos foram selecionados. Dos periódicos e bases de dados analisados, os que tiveram um número expressivo de artigos foram: Environment and Planning B com 22 artigos, Nexus<sup>10</sup> com 14 artigos, Architectural Design com 17 artigos, IJAC com 6 artigos e Automation and Construction com 5 artigos.

<sup>10</sup> Os artigos do periódico Nexus surgiram nas buscas nas bases de dados.

### **Segunda Etapa.**

Em Setembro de 2015 o *mapping study* foi atualizado fazendo as mesmas buscas nos periódicos e bases de dados para os últimos cinco anos (2009-2015), 17 novos artigos foram selecionados, analisados e incluídos na revisão. Ao total do estudo 168 artigos constituem esse levantamento bibliográfico compreendendo diversos aspectos do uso dos fractais em arquitetura.

### **Classificação.**

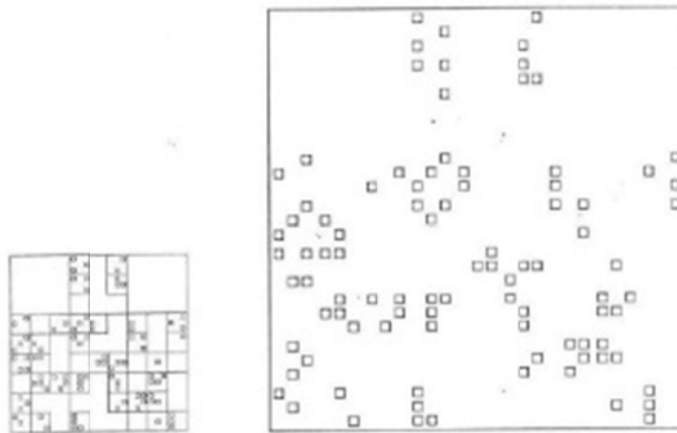
Uma avaliação dos documentos possibilitou classificá-los em grandes grupos de contexto e a eliminação de alguns artigos por não tratarem do tema com profundidade. Essas são grandes linhas de aproximação entre arquitetura e fractais. Os grupos são: **análise de percepção**: utilizam o método de contagem de quadrados para calcular a dimensão fractal em arquitetura (20 artigos); **análise urbana**: analisam questões urbanas e identificam padrões fractais (24 artigos); **ensino de projeto**: investigam metodologias apropriadas para o ensino de fractais em arquitetura (20 artigos); **crítica teórica e conceitual**: investigam questões teóricas e subjetivas da utilização de fractais em arquitetura (40 artigos); **prática arquitetônica**: utilizam os fractais como SG para projeto ou indicam métodos de projeto inovadores de arquitetura com aspectos fractais (64 artigos).

#### 4.3.1 Análise de percepção

A análise de percepção de arquitetura utilizando a GF para calcular a dimensão fractal baseia-se na contagem de quadrados, método descrito por Bovill (1996). Alguns estudos se preocupam em compreender e validar este método. Ostwald e Tucker (2007) elaboram uma breve revisão da literatura sobre arquitetura e GF, percebendo que as aplicações dos fractais como análise de arquitetura e formas urbanas têm resultados mais promissores. Neste artigo eles concluem que o método de Bovill é útil como ferramenta de análise, mas não expressa julgamentos de qualidade da arquitetura.

A discussão sobre caos, fractais, teoria da complexidade e auto-organização é constante na arquitetura nas últimas décadas. Bovill (2000) cita Charles Jencks e Itsuko Hasegawa como exemplos de arquitetos interessados nessas áreas. O artigo de Bovill (2000) explica algumas maneiras de abordar fractais em arquitetura como o método de contagem de quadrados aplicado em janelas projetadas por Frank Lloyd Wright. Ele também explica o processo de *curdling*<sup>11</sup> (Figura 90) para criar um padrão randômico em duas dimensões (poeira fractal).

Figura 90. *Curdling*.



Fonte: Bovill, 2000.

Os artigos, que retornaram das buscas, tratam do método de contagem de quadrados para definir a dimensão fractal de arquitetura histórica, como colunas e templos gregos (BOVILL, 2008 e CAPO, 2004), projetos de Le Corbusier (VAUGHAN, OSTWALD, 2009a), projetos de Peter Eisenman (VAUGHAN, OSTWALD, 2009b; OSTWALD, VAUGHAN, 2009), projetos de Eileen Gray (OSTWALD, VAUGHAN, CHALUP, 2008), projetos de Kazuyo Sejima (OSTWALD, VAUGHAN, CHALUP, 2009), casas da pradaria de

---

<sup>11</sup> *Curdling*: com uma grade desenhada, usar um gerador randômico (dado ou moeda) para decidir quais quadrados serão mantidos na grade, em seguida iterar novamente.

Frank Lloyd Wright (VAUGHAN, OSTWALD, 2011), sítios arqueológicos no México (OLESCHKO, *et al.*, 2000) e a igreja Santa Sofia (EDĪZ, OSTWALD, 2012). Ostwald, Vaughan e Chalup (2011) explicam com detalhes como funciona o fluxo de dados no método de contagem de quadrados computadorizado, provendo as potencialidades e limitações metodológicas e conceituais do método. A análise da dimensão fractal de edifícios não determina uma interpretação final do edifício e de suas qualidades, mas pode dar ajuda na compreensão das dimensões do objeto analisado.

Zarnowiecka (1998) também usa o método de contagem de quadrados para testar a dimensão fractal de arquitetura regional, com resultados similares aos obtidos por Bovill. O método de contagem de quadrados é questionado por Zarnowiecka (2002) por meio da quantidade de detalhes que os desenhos 2D (geralmente fachadas) devem apresentar. As variáveis do desenho selecionado podem afetar o resultado. Zarnowiecka conclui que a sugestão de Bovill para usar o método como uma ferramenta de avaliação estética talvez não possa ser eficiente.

Algumas ferramentas foram desenvolvidas para auxiliar o cálculo da dimensão fractal. Testes de verificação do método de contagem de quadrados (VAUGHAN, OSTWALD, 2010a) mostraram que a hipótese de que a arquitetura vernacular possa refletir a dimensão fractal do lugar não pôde ser comprovada. Vaughan e Ostwald, (2010b) também fazem a comparação do cálculo da dimensão fractal entre resultados anteriores de Bovill e Lorenz, usando os programas Archimage e Benoît. Lorenz (2009) faz a implementação do método de contagem de quadrados em programa CAD e também faz o procedimento usando VBA (*Visual Basic for Applications*) (LORENZ, 2012).

O método de contagem de quadrados não valida a qualidade da arquitetura. É um método analítico que permite replicar as medições em diferentes projetos, que em conjunto com outras análises, possibilita comparações. Uma questão fundamental na utilização deste método é a qualidade das imagens (quantidade de informação, hierarquia de traços, etc), que deve ser o melhor possível, provendo dados precisos para os cálculos. Este tipo de análise geométrica da arquitetura tem sua utilidade na investigação dos padrões que esteticamente podem ser mais valorizados pelos arquitetos. Esta ferramenta não é interesse desta tese, apesar de ser um método de análise apreciado por pesquisadores em todo o mundo.

#### 4.3.2 Análise urbana

Os fractais também contribuem para a compreensão das cidades e sua morfologia. Alguns pesquisadores utilizam a dimensão fractal ou a característica de apresentar detalhes autossimilares em diferentes escalas. Salingaros (2005a), por exemplo, indica as cidades medievais como as que melhor representam uma cidade fractal. Esse comportamento geralmente é expressado pelo termo *fractality*<sup>12</sup>. Na questão da análise urbana uma metodologia muito usada é o cálculo da dimensão fractal que é feito computacionalmente.

Batty e Longley (1987) investigam a dimensão fractal das cidades de Londres e Cardiff e sua forma de crescimento. Em 1994, Batty e Longley publicam o estudo *Fractal Cities* como um método para entender e planejar a forma da cidade, com análises completas de diversas cidades. Estas obras se tornaram referenciais na compreensão do crescimento fractal das cidades de crescimento espontâneo. Outros pesquisadores como Benguigui *et al.* (2000) e Chan e Chiu (2000) investigam quando uma cidade é fractal, as pesquisas focam no cálculo da dimensão fractal na evolução da cidade de Tel Aviv e Taipei respectivamente.

No Brasil, também alguns pesquisadores se dedicaram a estas análises. Marques (2008) analisa o crescimento urbano de São Paulo por meio da dimensão fractal. Naoumova, Bourchtein e Bourchtein (2014) fazem a análise por meio do método de contagem de quadrados para as cidades de Ouro Preto e Pelotas. Palma (2014) calcula a dimensão fractal de cidades gaúchas: Estrela, Lajeado, Santa Cruz do Sul, Venâncio Aires e Vera Cruz, como alternativa de análise urbana usando GF. Essas análises ajudam a compreender alguns aspectos das cidades: vazios urbanos, fragmentação do tecido e a semelhança em diferentes escalas. Um exemplo desta abordagem é a pesquisa de Luca (2007) que propõe uma plataforma generativa e interativa para o planejamento urbano usando a dimensão fractal para a análise de padrões urbanos.

Alguns pesquisadores também fazem uma relação direta entre os fractais e as cidades. Salingaros (2005a)<sup>13</sup> explica o que considera ser uma cidade fractal, uma série de características como a presença de áreas verdes e edifícios com arcadas por exemplo, ele também explica como conectar a cidade usando propriedades fractais. Os trabalhos de Salingaros, geralmente baseados na Linguagem de Padrões do Alexander, são uma excelente referência para o desenho urbano considerando a GF. Crompton (2005) faz um paralelo da GF

---

<sup>12</sup> *Fractality*: fractalidade, apresentar comportamento semelhante aos característicos de um fractal.

<sup>13</sup> O estudo do capítulo do livro de Salingaros (2005) embasou o artigo Paisagem fractal: uma análise da conectividade na escala humana de Sedrez, Pereira e Santiago (2008), cujo objetivo foi identificar elementos urbanos capazes de conectar espaços e a circulação peatonal na cidade.



com o ambiente construído, que aumenta o perímetro e mantém a área conforme a escala diminui. Chen e Zhou (2006) buscam interpretar a fractalidade de formações urbanas centrais.

Anderson, Rasmussem e White (2002) buscam padrões de crescimento urbano com regras iterativas produzindo configurações fractais, dependendo exclusivamente das regras generativas. Sendo possível identificar quais padrões generativos se assemelham a cidades, também é possível modelar ou remodelar cidades, por exemplo, Chen e Zhou (2003) afirmam que cidades com hierarquia autossimilar em estrutura de cascata podem ser modeladas com algumas regras recursivas. Leach (2009) comenta sobre experiências recentes da A.A. School para gerar projetos urbanos com técnicas digitais, algumas delas usando a GF, no entanto não aprofunda em detalhes.

Assim aplicações podem ser feitas em diversos aspectos urbanos como Lu e Tang (2004) que usam o método de contagem de quadrados modificado para descrever a propriedade fractal do sistema de transporte urbano de Dallas. Cooper, Watkinson e Oskrochi (2010) e Cooper e Oskrochi (2008) utilizam o cálculo da dimensão fractal de vistas de ruas para comparar o nível de variedade visual que apresentam. Batty (*et al.*, 2008) preocupa-se com a escala entre edifícios na cidade com propriedades fractais (compostas de *clusters* fractais em muitas escalas cuja ordem parece seguir regras bem definidas).

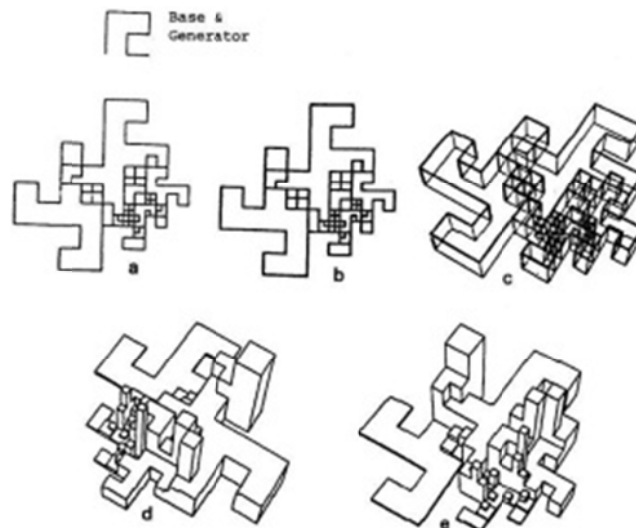
Em vários lugares do mundo, pesquisadores se preocupam em identificar relações entre os fractais e o crescimento urbano. Feng e Chen (2010) fazem um estudo espaço-temporal da cidade de Hangzhou analisando a autossimilaridade e a dimensão fractal. Thomas (*et al.*, 2010) identifica padrões de áreas urbanas europeias: Besaçon, Cergy, Lille, Lyon, Montbéliard, Brussels, Charleroi, Stuttgart, Ruhr, com curvas de comportamento fractal. Terzi e Kaya (2011) produzem uma análise da dinâmica de expansão da cidade de Istambul com a GF. Essas pesquisas trazem uma reflexão da cidade sob a ótica da complexidade estabelecendo padrões e parâmetros.

Algumas aplicações mais diretas surgem na pesquisa de Tannier (*et al.*, 2012), que faz um estudo comparativo da acessibilidade em projetos urbanos virtuais fractais e não-fractais. Também de Kobayashi e Subhadha (2005) que utilizam padrões fractais clássicos para simular a distribuição de unidades habitacionais em um terreno. Essa é a aplicação em projeto urbano com o uso da GF como SG, contudo as simulações são geradas rapidamente, e necessitam de uma avaliação e aprofundamento na proposta como os próprios autores colocam nas conclusões. As proposições de GF na análise urbana trazem conceitos importantes de como ocorre a formação espontânea de cidades, pois tendem a se comportar autossimilarmente em diferentes escalas.

#### 4.3.3 Ensino de projeto

Na década de 80, Yessios (1987) publicou o artigo *A Fractal Studio* que relata uma experiência usando ferramentas CAAD, o computador foi usado para explorar e gerar formas arquitetônicas. Os algoritmos foram baseados em processos generativos, entre eles a GF. Os processos fractais gerados foram então alterados por requerimentos utilitários das funcionalidades de um edifício. Os projetos, que são volumetrias simplificadas sem escala, derivaram de tramas produzidas pela GF (Figura 91). Quando o artigo foi escrito havia um movimento internacional para discutir o papel do computador nas aulas de projeto. Yessios previa que essas ferramentas generativas seriam cada vez mais usadas.

**Figura 91.** Processo generativo.



Fonte: Yessios, 1987.

As discussões da abordagem da GF no ensino de arquitetura são variadas: como ensinar matemática para arquitetos, como relacionar fractais e arquitetura, e os programas computacionais apropriados. Sedrez, Baier e Krindges (2012) aproximam a GF de alunos do ensino médio por meio de obras de arquitetura inspiradas em fractais, buscando atualizar o ensino de matemática. De maneira similar, Tinnirello, Voget and Federico (2004) investigam novas tecnologias de ensino de matemática e geometria, incluindo transformações fractais em seu estudo para recriar formas de obras arquitetônicas existentes. Sala (2003) e Verner e Maor (2003) discutem qual papel o ensino de matemática utilizando novas tecnologias deve assumir dentro das faculdades de arquitetura. Williams (2009) relata duas iniciativas de apresentar as relações entre a matemática e a arquitetura nas disciplinas de desenho para arquitetura do primeiro ano dos cursos. Em ambos a GF aparece como potencial geradora de padrões, formas e arquitetura.

Cepeda (2005) pesquisa sobre o ensino de matemática em faculdades de arquitetura, buscando uma mudança de paradigma usando a metodologia *Problem-Based Learning (PBL)*<sup>14</sup>. Cinco unidades (cenários reais) foram construídas seguindo o PBL: propagação paramétrica da forma em arquitetura estrutural, projeto otimizado de caixas e containers, ergonomia e projeto, *tensegrity*, e “arquitetura fractal”. Uma conclusão importante deste artigo é necessidade de incluir conteúdos de geometria nos cursos de arquitetura. Sorguç (2005) explica: “[i]n every architectural design, mathematics has several manifestations that contribute to the process [...]”, colocando em pauta a preocupação sobre alterações do ensino de matemática em arquitetura. O autor torna conceitos matemáticos familiares para estudantes de arquitetura por meio de exemplos que relacionam esses conteúdos. Nestes primeiros artigos descritos há a preocupação com o ensino da matemática na arquitetura, especialmente buscando novos métodos criativos de abordar esses temas, uma reflexão sobre essa questão deve ser feita no Brasil também.

Joye (2005, 2006) explica o motivo pelo qual a GF pode ser utilizada no ensino de arte e projeto. O autor indica os aspectos cognitivos que os fractais despertam por sua relação com a natureza e que os seres humanos demonstram preferências por ambientes naturais e formas orgânicas. Explica a importância de introduzir esses conceitos no ensino contemporâneo para provocar uma mudança no modo de entender a natureza e seus padrões fractais predominantes. Estes artigos relatados acima mostram uma preocupação em renovar o ensino de matemática e geometria em arquitetura, identificando conteúdos e métodos mais atuais e adequados.

Outros artigos fazem aplicações diretas da GF no ensino de arquitetura. Ediz e Çagdas (2004) elaboram um gerador de formas (CADaFED – *Computational Architectural Design approach based on Fractals at the Early Design*) baseado na dimensão fractal para as fases iniciais do projeto. Segundo os autores há diferentes abordagens para o projeto arquitetônico computacional: processo de resolução de problemas (*problem-solving*) baseado em processamento de informação (*information-processing*) ou *Shape Grammar*. Fractais são considerados pelos autores como um subconjunto de gramática da forma. O objetivo deste método é dar suporte para a criatividade nas fases iniciais do projeto, gerar e selecionar um conjunto de formas alternativas preliminares e explorar o potencial das tecnologias de projeto digital no processo de projeto arquitetônico computacional. Os autores desenvolveram um algoritmo que gera alternativas volumétricas com diferentes dimensões fractais (**Figura 92**). O

---

<sup>14</sup> *Problem-based learning* – aprendizagem baseada em problemas.

programa calcula a dimensão fractal de uma estrutura urbana existente por meio do método de contagem de quadrados.

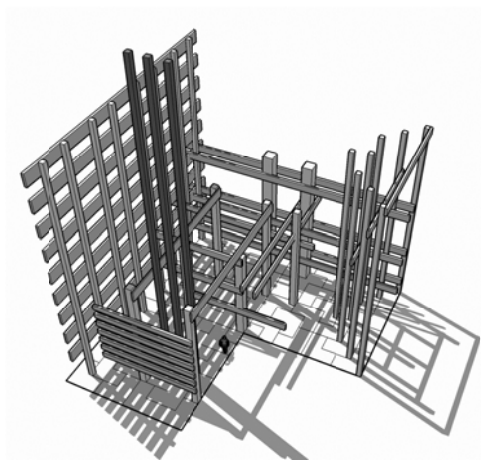
**Figura 92.** Formas alternativas baseadas em dimensões fractais.



Fonte: Ediz e Çagdas, 2004.

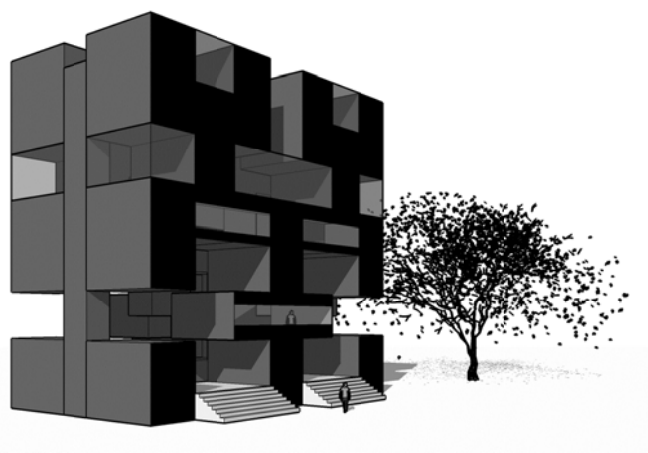
Hendrickx (*et al.*, 1996) procura usar as ferramentas CAAD além de meramente aquisição de habilidades de desenho, mas incorporada em um debate sobre teoria de projeto. Entre as diversas experiências avançadas de projeto os alunos utilizam a construção de árvores fractais com o Autolisp aprendendo a programar dentro de um ambiente CAAD. Outra pesquisa semelhante é a de Sedrez (2009 e 2012) que explica a experiência de utilizar fractais como meio de ensinar um programa CAAD em um ambiente virtual de aprendizagem. Algumas atividades foram propostas desenhando as iterações dos fractais manualmente, tomando como base os exercícios de projeto criados por Moisset (2003). Os fractais são usados como trama reguladora para transformações na geometria: traçado regulador (**Figura 93**), seção perfilada da planta baixa, módulos fractais bidimensionais (**Figura 94**), seção perfilada do corte, sobreposição de escalas.

**Figura 93.** Traçado Regulador



Fonte: Sedrez, 2009.

**Figura 94.** Módulos fractais bidimensionais.



Fonte: Sedrez, 2009.

Ainda sobre aprendizagem *online*, para Francis (2007), resumidamente a arquitetura pode ser representada como fractais, pois, lidam com informação complexa de

maneira simples. A proposta do autor é de ambiente colaborativo *online* para projeto de arquitetura utilizando GF (IFS).

Chase (2005) trata de ferramentas generativas de projeto para designers novatos, citando dentre as possibilidades de gerar padrões abstratos de forma recursiva a GF, no artigo não há um aprofundamento neste item. Steim, Silva e Pires (2012) comparam alguns programas de geração de formas fractais com o intuito de aproximar esses conceitos da arquitetura.

Uma consideração muito importante é a de Fischer e Herr (2001) que afirmam que um novo campo de ensino surge nas últimas décadas: projeto generativo, por ser tão recente, ainda não possui metodologias, experiências e materiais de estudo. Os tópicos crescimento algorítmico, inteligência artificial, comportamento emergente, fractais se originaram na matemática e física, portanto, ainda é um desafio ajustar esses conteúdos para arquitetura e design.

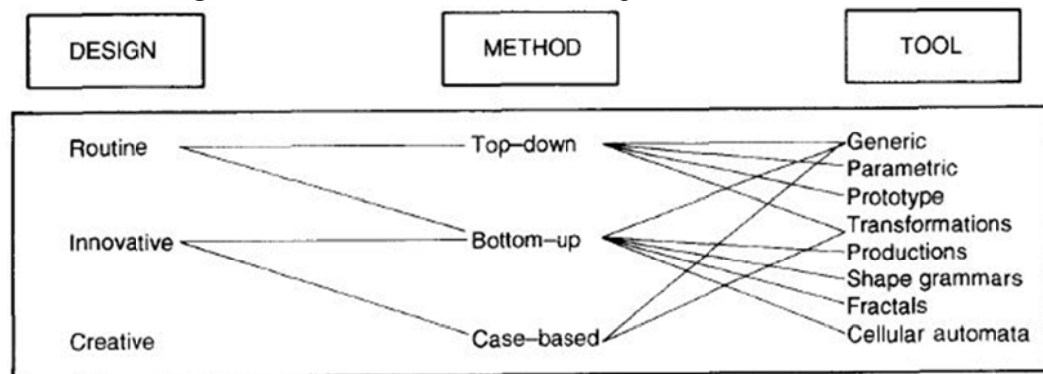
Nesta seção observa-se uma preocupação em como ensinar conteúdos da Complexidade como a GF para arquitetura. A dificuldade encontra-se em incluir a GF e outros temas da matemática no ensino de projeto, que apesar de serem necessários para uma abordagem contemporânea da arquitetura, não fazem parte dos conteúdos obrigatórios.

#### 4.3.4 Crítica teórica e conceitual

O *mapping study* resultou em quarenta documentos que foram classificados sob o título de crítica teórica e conceitual. Estes artigos tratam da arquitetura e fractais de um modo a compreender como se dá essa relação. A seguir são explicados os artigos mais relevantes resultantes da busca.

Stiny (1991:171) explica “[d]esigners work with descriptive devices of many kind”. Esses recursos que os arquitetos utilizam para descrever formas podem ser espaciais ou simbólicos. Stiny explica brevemente que os fractais também são uma gramática de formas. Para o autor regras fractais e ou regras simétricas são apenas uma variedade de gramática da forma, portanto podem funcionar como sistema generativo. Schmitt e Chen (1991:249) afirmam “[f]ractals are a subset of shape grammars. The number of rules is small, the number of recursions high, and self similarity [sic] is guaranteed”. Os autores classificam o projeto arquitetônico em classes diferentes: a) rotina, parametrização do protótipo; b) inovativa, adaptação do protótipo ou combinação do protótipo; c) criativa, criação do protótipo. Em seguida criam classes de métodos: *top-down*, *bottom-up* e *case-based*. Por fim, são identificadas classes de ferramentas: genérico, paramétrico, protótipo, transformações, produções, *shape grammars*, fractais, autômato celular. O cruzamento dessas classes pode ser verificado na **Figura 95**.

**Figura 95.** Cruzamento de classes de design, métodos e ferramentas.



Fonte: Schmitt e Chen, 1991.

Percebe-se que os fractais como ferramenta de projeto derivam de um método *bottom-up*, ou seja, usa formas e dados existentes para chegar à uma solução. E é classificado em uma classe de projeto inovativo, o que quer dizer que a ideia de onde se quer chegar é geral, então a combinação de protótipos se faz necessária.

“*Fractal architecture*”: late twentieth century connections between architecture and fractal geometry de Michael Ostwald (2001), pode ser considerado um dos artigos mais

importantes sobre a reflexão entre arquitetura e fractais. Ostwald (2001:79) examina a constante alteração na relação entre a GF e arquitetura:

*“At times this dependence is diffuse, and modes of theoretical transference are subtle, symbolic or semiological. At other times wholesale appropriations of geometry takes place and large fragments of theory are pirated away from their originating discipline and used opportunistically”.*

Qual o significado desta afirmação do autor? Para Ostwald os arquitetos e matemáticos divergem sobre arquitetura que utiliza fractais. Os arquitetos têm valorizado essa utilização pela conexão com a teoria do Caos e Ciência da Complexidade, sem uma preocupação em como utilizar adequadamente estes conceitos, enquanto que os matemáticos raramente têm notado a apropriação de fractais pela arquitetura, mesmo usando conceitos de arquitetura para nomear certos fractais (Devil’s staircase, Sierpinski carpet).

Ostwald (2001) afirma que o surgimento (*the rise*) da “arquitetura fractal” se deu em 1978 até 1988 após a publicação em 1977 do livro *Fractals: form, chance and dimension* de Mandelbrot. Ocorrendo alguns anos depois do que se considera a morte do modernismo, a demolição do conjunto habitacional Pruitt-Igoe do arquiteto Yamasaki em 1972 (Figura 96). Já o declínio (*the fall*) da “arquitetura fractal” ocorre a partir de 1989 até 1999. Nesta fase alguns arquitetos evitam relacionar seus projetos com teoria da Complexidade, e os fractais são até relacionados como “uma forma de vírus que infecta a geometria euclidiana” (IBID.).

**Figura 96.** Demolição do conjunto habitacional Pruitt-Igoe.



Fonte: U.S. Dept. of Housing and Urban Development, 2009.

Um dos primeiros arquitetos que se apropriaram dos fractais no projeto foi Eisenman, especificamente o conceito de *scaling* fractal. Ele descreve sendo: “*three destabilizing concepts: discontinuity, which confronts the metaphysics of presence; recursivity, which confronts origin; and self-similarity, which confronts representation and the aesthetic object*” (EINSEMAN, 1988). Ostwald (2001) explica que os projetos *House 11a* e *Moving Arrows, Eros and other Errors* de Eisenman usam também os mesmos conceitos de *scaling*. No projeto *Choral Works* elaborado com Jacques Derrida, *scaling*, autossimilaridade e autoreferencialidade estão presentes, porém de maneira mais teórica e menos geométrica.

Ostwald (2001) lista alguns arquitetos que posteriormente utilizaram fractais em arquitetura: Asymptote, Charles Correa, Coop Himmelblau, Carlos Ferrater, Arata Isozaki,

Charles Jencks, Christoph Langhof, Daniel B. H. Liebermann, Fumihiko Maki, Morphosis, Eric Owen Moss, Jean Nouvell, Philippe Samyn, Kazuo Shinohara, Aldo e Hannie van Eyck, Ben van Berkel e Caroline Bos, Peter Kulka e Ulrich Königs, Eisaku Ushida e Kathryn Findlay. Contudo o autor não apresenta em quais projetos especificamente é possível encontrar os conceitos da GF. Nesta tese é importante que a relação entre os fractais e arquitetura seja clara, direta e possivelmente generativa, possibilitando a compreensão/replicação do processo de projeto adotado pelos arquitetos.

Sala (2006) divide a análise de fractais em arquitetura em uma escala pequena – componentes de um edifício – na qual se observa a autossimilaridade, os componentes se repetem em diversas escalas; em uma escala grande – organização urbana – onde se observa a autossimilaridade na urbanização e fractais presentes no tecido urbano. Joye (2007) também acredita que uma arquitetura com características fractais está muito relacionada com a quantidade de detalhes nas diferentes escalas. Joye (2007:313) desconsidera, por exemplo, o projeto Federation Square do escritório LAB como um exemplo da utilização de fractais na arquitetura: *“I find the relation of tiled façades with fractal geometry difficult to judge. [...] In a sense, the patterns are no more fractal than a grid of squares is fractal”*. Do ponto de vista matemático, aparentemente pelo entendimento de Joye, só é possível observar um fractal em arquitetura se for possível reconhecer iterações em cascata. Por outro lado o autor finaliza afirmando que o cérebro tem preferência por estruturas fractais e, portanto esse comportamento na arquitetura seria benéfico.

Em 2011, Joye argumenta, de acordo com diversos autores, o que pode ou não ser considerado “arquitetura fractal”, por exemplo, se o edifício expressa em sua arquitetura autossimilaridade em diversas escalas. Ao apresentar projetos que possuem características fractais na planta baixa, o autor lamenta que essas características não possam ser percebidas com o edifício construído. Fractal é um conceito matemático abstrato. Conceitualmente não existe “arquitetura fractal”, pois não é possível aplicar as regras infinitamente na arquitetura, esse mesmo problema ocorre na natureza, o número de iterações é geralmente finito.

Dentre os textos que procuram estabelecer conceitos de arquitetura e fractais está o artigo de Crompton (2001) que interpreta a dimensão fractal dos espaços e busca criar de maneira subjetiva mais espaço. A ideia do autor é medir os espaços usando fractais para perceber se representam bem como o espaço é realmente utilizado. Crompton (2002) estuda a composição de molduras, detalhes e cornijas usando fractais. Ele (*Ibid*:451) explica: *“[...] fractals are identified in classical mouldings by means of an algorithm for drawing Levy staircases. [...] traditional rules of composition favour fractal forms such as these [...]”*.



Neste artigo o autor analisa colunas gregas para encontrar padrões de dimensão fractal. Crompton (*Ibid*:451) ainda afirma: “[a] *building is fractal if it repeats and multiplies a form, such as a pointed arch, over several orders of size*”. O autor busca alternativas para entender o comportamento fractal em arquitetura sem a necessidade de aplicar os fractais diretamente como SG.

Nikos Salingaros é um pesquisador famoso por sua crítica ao movimento modernista na arquitetura pela falta de aspectos fractais nos edifícios: poucas escalas e as escalas não são conectadas (Salingaros, 1999a). Salingaros (1999b:81) afirma “[m]odernism removes fractals from our environment”. Em construções do passado as similaridades matemáticas eram apreciadas, dentre elas a estrutura fractal. Além disso, ele explica que alguns arquitetos relacionam o desconstrutivismo com o caos e fractais, mas podem ter usado conceitos equivocados. Para Salingaros (1999b:82) existem maneiras inovadoras de aplicar fractais em formas construídas, por exemplo, “[i]nnovative architects may wish to generate fractal rhythms in order to explore complexity at the interface between organization and chaos [...]”.

Uma das contribuições do artigo de Lee (2014) é um resumo de princípios da GF aplicáveis para a **análise** de arquitetura (Tabela 8) e também princípios **gerativos** de forma aplicados ao projeto arquitetônico, que já tenham sido usados por arquitetos: *scaling, superimposition trace, distortion, repetition* (Tabela 9).

**Tabela 8.** *Summary and analysis: análise da forma.*

<i>Fractal element</i>	<i>Application in architectural design analysis</i>
<i>Fractal dimension</i>	<i>Cognition process about architectural design by sequence</i>
	<i>Observer do no look at building at fixed point, but sense change of Fractal dimension on eye through uninterrupted experience that feel on whole body and through motion in actuality environment</i>
<i>Box-counting dimension</i>	<i>Elevation analysis by using box-counting dimension in architectural design</i>
	<i>It can compare with the complexity of detail as quantitative counting by analyzing result of Villa Savoye of Le Corbusier and Robie House of Frank Lloyd Wright</i>
<i>Fractal rhythm</i>	<i>Analysis of fractal rhythm in grid pattern of architecture and city</i>
	<i>By analyzing fractal rhythm in grid pattern of architecture and city, it can analyze degree that order and change are mixed as qualitative. Although it is complicated if it apply this, it can create pattern similar to order of nature.</i>

Fonte: Lee (2014).

**Tabela 9.** Summary and analysis: geração de forma.

Architecture work	Self-similarity	Non-linearity	Randomness
<i>Peter Eisenman, Cannaregio Region Compartment &amp; House 11A</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combination of self-similarity to various size by scaling of house 11A: L shape</li> <li>• Canaregio Region Compartment: house 11A of various size is arranged in Canaregio region</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L shape: borrowing as form that 1/4 shows lacking unstable action in an exact square</li> <li>• Create form of house as overlapping atypically each other</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformation of Scale of house 11A into big or small excessively</li> <li>• Make privilege of objet [sic] lose in specification scale by exuviating from existent house</li> </ul>
<i>Shyhei Endo, Springecture H Public Lavatory</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Self-similarity structure of flowing curved surface that is created by tabula metal skin</li> <li>• It seeks organic with nature by consecutiveness with scenery that appear through physical construction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Change on outer skin that cotinous [sic] line is awry and is wrenched from three-dimensional space</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Progress of form creation of metal skin that is uncompleted and uncertainty</li> </ul>
<i>Peter Eisenman, Max Reinhardt Haus</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meaning of prism including big city by expressing meaning of congestion of big city to tensed retroaction</li> <li>• Non-linear form is not organization mechanism, but emphasize organic originality of nature</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• After circumvolve plates in Mobius band of third dimension space, create non-linear form, seemed to fold by polymerizing</li> <li>• Express dynamic state between time and space by materializing traces that move of plates that is not visualized</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Creation of non-linear form is meaning change, own organization</li> <li>• Emphasis about decentering meaning through taking to pieces</li> </ul>
<i>Zvi Hecker, Heinz-Galinski School</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Composition of individual masses which is spread by spiral structure of self-similarity</li> <li>• Pursuit for organic with nature (organic composition of city context and extensive metaphor of nature such as snake, fish, mountain and so on)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pursuit of universal order by dynamic of sunflower</li> <li>• By own similarity unfolding of three system of spiral style action, grid, concentric circle, strong induction to center</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• By detaining the existent tree and arranging mass, promenade is narrow and hoof, that is created episodically</li> </ul>
<i>Daniel Libeskind, Victoria &amp; Albert Museum</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Self-similarity composition of ceramic tile that is used for material of outer wall</li> <li>• Express possibility of various and infinite transformation in self-similarity form of distorted spiral</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trajectory of dialectical action of contorted spiral</li> <li>• System of the line of flow and whole form of spiral style of chaos</li> <li>• Various exhibition system that are involved in difference and similarity through maze structure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boundary destruction of wall floor and ceiling by reiteration that is random repetition of distorted spiral</li> </ul>

<i>Architecture work</i>	<i>Self-similarity</i>	<i>Non-linearity</i>	<i>Randomness</i>
<i>Frank O. Gehry, Guggenheim Museum Bilbao</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Self-similarity metaphor of retroaction shape that is growing petals</i></li> <li>• <i>Organic consecutiveness of nature and city by shape that seem to rise on water surface</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Distortion of liner [sic] elements of wall, the floor, roof etc. by status conversion</i></li> <li>• <i>Express highly, intricately and freely of fluid shape like flowing petal through the way of folding</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Deduction to fluid shape like flowing liquid as size and topology of 26 petal are decided by random</i></li> </ul>
<i>Greg Lynn, Cardiff Bay Opera House</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Seek organic with surrounding context by extending coastline to yacht anchorage around earth</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Oval that was modeled on Oval Basin is repeat non-linear and asymmetry along direction of topography</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Whole shape is not decided from whole shape in the beginning</i></li> <li>• <i>By differentiation between growth and change by symmetry destruction, evolution of form by time</i></li> </ul>
<i>Bernard Tschumi, Glass Video Gallery</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Transparency of glass scatters city boundary and infinitely extends space visually</i></li> <li>• <i>Seek consecutiveness with city environment by pulling down the border of building interior and exterior</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>By becoming objet [sic] of city space and intermediate that show city space at the same time, formation of ring of circulation Mobius strip</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Surface that keep phenomenon that is indeterminacy and temporary by immaterial and material of glass</i></li> </ul>

Fonte: Lee (2014).

Dos exemplos citados por Lee (2014), o projeto de Libeskind usou efetivamente os fractais como regra para a geração de forma, os demais adotaram os conceitos de maneira abstrata.

Vios e Ramilo (2013) descrevem novos processos de geração de formas na arquitetura possíveis a partir das novas tecnologias digitais: projeto computacional e fabricação digital. Os autores categorizam diferentes métodos de projeto, após elaborarem cinco projetos de arquitetura usando ferramentas computacionais: *natural morphology*, *morpho-biology*, *morpho-ecology*, *morpho-topology*, *space grammar*, *boolean operation*, *fractal geometry*, *folding design* e *fluidity pliant*. Em seguida calculam a relevância entre os métodos tradicionais e os métodos digitais atribuindo notas de -3 a 3, sendo -3 vulnerável, -2 fraco, -1 insuficiente, 0 satisfatório, 1 adequado, 2 forte e 3 excelente. Uma tabela (Tabela 10) de diferencial semântico da GF é apresentada pelos autores com a escala atribuída a dezesseis questões. Apesar dos resultados serem de certa maneira subjetivos, destaca-se nesta correlação a boa avaliação do projeto, a agilidade no processo, as múltiplas fontes de inspiração para o projeto, e o excelente fluxo entre a busca pela forma e a produção digital,

além disso, a GF ainda é forte como SG de formas e permite correções e alterações facilmente.

**Tabela 10.** Diferenciais semânticos – Geometria Fractal.

<b>Traditional design process (-3)</b>	<b>Scale</b>	<b>(3) Digital design process</b>
<i>Manual pre-hand sketches</i>	-3 -2 -1 0 1 <b>2</b> 3 <i>Strong computational process</i>	<i>Computational process</i>
<i>Spontaneous flow of idea</i>	-3 -2 -1 0 1 <b>2</b> 3 <i>Strong equipment dependency</i>	<i>Equipment dependent</i>
<i>Limited design evaluation</i>	-3 -2 -1 <b>0</b> 1 2 3 <i>Excellent design evaluation</i>	<i>180 degrees design evaluation</i>
<i>Difficulties on planning correlation</i>	-3 -2 -1 <b>0</b> 1 2 3 <i>Satisfactory design correlation and coordination</i>	<i>Flowless design correlation</i>
<i>Difficulties on complex forms</i>	-3 -2 -1 0 1 2 <b>3</b> <i>Adequate unlimited design complex form</i>	<i>Unlimited complex forms</i>
<i>Longer manhour</i>	-3 -2 -1 0 1 2 <b>3</b> <i>Excellent man-hours</i>	<i>Lesser manhour</i>
<i>Low cost in organizational production</i>	-3 -2 -1 <b>0</b> 1 2 3 <i>Satisfactory cost in production</i>	<i>High cost in production</i>
<i>No need of technological training</i>	-3 - <b>2</b> -1 0 1 2 3 <i>Weak technical training</i>	<i>Need technological training</i>
<i>Difficulties on changes and correction</i>	-3 -2 -1 0 1 <b>2</b> 3 <i>Strong easier quick for correction and changes</i>	<i>Easier and quick for changes, correction</i>
<i>Limited source of design inspiration</i>	-3 -2 -1 0 1 2 <b>3</b> <i>Excellent multiple source of design inspiration</i>	<i>Multiple source of design inspiration</i>
<i>No generative complex generation</i>	-3 -2 -1 0 1 <b>2</b> 3 <i>Strong generative design forms</i>	<i>Generative inspired forms</i>
<i>Artistic modeling presentation</i>	-3 -2 -1 0 <b>1</b> 2 3 <i>Adequate modeling presentation</i>	<i>Realistic modeling presentation</i>
<i>2D flat surface design format</i>	-3 -2 -1 0 <b>1</b> 2 3 <i>Adequate surface format</i>	<i>3D surface format</i>
<i>Segmented technical flow from design to production</i>	-3 -2 -1 0 1 2 <b>3</b> <i>Excellent flow of design from form finding to digital design production</i>	<i>Continuous technical flow from form findings up to design production</i>
<i>No wire framing, additive deductive forms finding</i>	-3 -2 -1 0 1 <b>2</b> 3 <i>Strong wire framing design</i>	<i>Wired framing, additive deductive form finding</i>
<i>Limited modeling presentation</i>	-3 -2 -1 0 <b>1</b> 2 3 <i>Adequate modeling presentation</i>	<i>Unlimited modeling presentation</i>

Fonte: Adaptado de Vios e Ramilo (2013).

Rumiez (2013) é uma autora que relaciona três tópicos: o desaparecimento do ornamento, a necessidade do ser humano de formas naturais e complexas e finalmente a GF na arquitetura. Rumiez (*ibid.*) conclui em seu artigo: “*there is a very high potential when the rule generates a complex structure that is self-similar and somehow infinite [...]. Moreover, a fractal approach can help in re-defining a role of detail in architecture*”.

A presente seção ajuda a conceituar um pouco mais a arquitetura com fractais. E ainda levanta a questão sobre a maneira como os fractais podem gerar formas úteis para a arquitetura, bem como projetos relevantes. Os últimos três artigos analisados trazem dados concretos da GF na arquitetura, mostrando inclusive o potencial dos fractais muito mais relacionados ao projeto digital. Por fim evidencia-se que o conceito de “arquitetura fractal” não é um consenso entre os pesquisadores do tema.

#### 4.3.5 Prática arquitetônica

A maneira como os arquitetos usam a GF no projeto está analisada nesta seção. Nos anos 80 os fractais ainda eram um tema recente e os pesquisadores buscavam maneiras de compreender os fractais e como representa-los, construí-los.

Carpenter (1980) informa que fractais são uma classe de formas altamente irregulares que aparecem no mundo real: ilhas, rios, turbulência, flocos de neve, contudo na maioria dos casos com um número finito de iterações. Fractais clássicos incluem caminho Browniano, Conjuntos de Cantor e curvas de preenchimento do espaço. O autor explica como criar curvas fractais com procedimentos computacionais, mas não faz uma relação com a arquitetura. Demko (1985) tem a mesma preocupação com a construção e representação de fractais no computador. Ou seja, logo após o surgimento dos fractais alguns pesquisadores começam a refletir nos potenciais usos para a arquitetura.

Por exemplo, Schmitt (1987:102) afirma: “[g]eneration of fractals, however, is an interesting capacity unique to computers, and therefore of considerable interest for the further development of Computer Aided Design”. O autor acredita que implementar algoritmos fractais em computador pode contribuir com um processo criativo de projeto. Schmitt (*ibid.*:104) conclui o artigo explicando: “[...] the use of function oriented programming, and the application of fractal algorithms in the description and generation of design are important steps in understanding the design process”. Essa visão de Schmitt é uma das premissas desta tese (explorada no capítulo 8), entender o processo de projeto por meio da geração de fractais computacionalmente, sendo realmente uma atividade interessante para arquitetos.

A partir dos anos 90 os pesquisadores adquirem uma visão mais prática de como aplicar fractais na arquitetura por meio de programação. Week (1991) relaciona a geometria da forma e processos generativos, explicando como formas podem ser descritas com símbolos e palavras por programas CAD, dentre elas formas fractais. A ideia era a de usar os recursos dos programas CAD não apenas para a representação, mas também para a criação de formas e padrões por meio de SGs. Week (*ibid.*:58) afirma:

*“Generative languages are also an intuitively accessible concept. There is nothing mysterious or mind-boggling about the sequence of steps of the generative grammar I created while designing, or its relationships to the resulting form”.*

Como utilizou programação textual, Week (*ibid.*:58) relata um “problema” ao programar fractais: “the only way to see the attractor [...] seems to be to run the system, and see what is generate”. Essa dificuldade realmente é verdadeira, se faz necessário rodar o

algoritmo para ver os resultados, iterar diversas vezes, especialmente quando se testam alternativas.

Garcia, Fernandez e Barrallo (1994) acreditam que uma das maiores contribuições da GF para CAAD é a geração de formas naturais como montanhas, árvores para criar efeitos de paisagens e texturas. O artigo explora a representação de formas da natureza com programas de geração fractal. Definitivamente essa não é a maior contribuição da GF no projeto, apesar de ser uma possibilidade que pode ser explorada, os fractais tem um potencial muito maior. Outra pesquisa interessante é a de Drewes *et al.* (1995) que estuda gramática de colagem estabelecendo uma conexão com a GF. A gramática de colagem possui regras recursivas de substituição e adição semelhantes a dos fractais, contudo não foi descrito nenhum uso na arquitetura para a gramática.

A partir do ano 2000 os estudos começam a ter mais resultados visuais da aplicação de fractais. Harris (2007) faz algumas constatações sobre a relação fractal nas obras de Frank Lloyd Wright e Piet Mondrian. Para ele a arquitetura orgânica de Wright apresenta características análogas à de IFS (*Iterated Function System*). Harris desenvolve alguns modelos fractais (**Figura 98**) semelhantes à obras de arquitetura como a casa Palmer (**Figura 97**), como o edifício Johnson Wax ou usando os quadros de Mondrian para criar fachadas. É possível perceber as similaridades entre os objetos apresentados. Harris é um dos entrevistados da tese no capítulo 7.

**Figura 97.** Casa Palmer.



Fonte: Harris, 2007.

**Figura 98.** Iterações de triângulos.



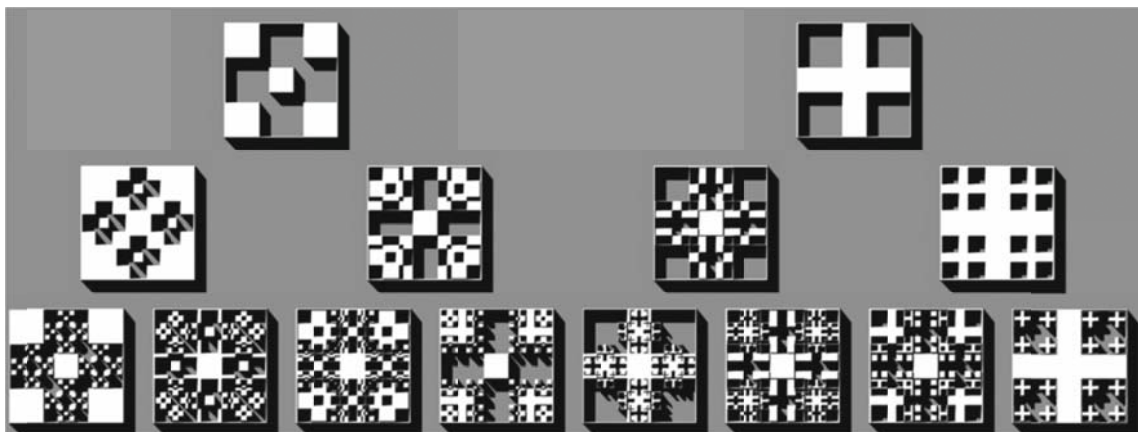
Fonte: Harris, 2007.

Farr (2007) comenta sobre a ocorrência de fractais na natureza, por exemplo, na estrutura do tecido esponjoso ósseo. Um fato importante identificado pelo autor é que estruturas fractais podem ser altamente eficientes quando as cargas são muito suaves e o material é muito quebradiço. Já Hornby e Pollack (2001) criam um sistema para produzir um projeto generativo com uma estrutura regular estática, neste caso mesas que foram impressas em 3D. L-systems parametrizados criam o código para construir um algoritmo evolutivo.

Outro caso de uso de fractais para criação de estruturas é o de Asayama e Mae (2015), no qual um domus sextavado é subdividido recursivamente e analisado estruturalmente.

Corcuff (2012:67) ao estudar modularidade e proporções no projeto arquitetônico afirma: “[m]ore precisely, generative art is based upon transformation processes, which include cellular automata, formal grammars, L-systems, fractal processes, iterated function systems (IFS), genetic algorithms, artificial life, and so on[...]”. A autora gera pares de IFS e com um procedimento de hibridização entre eles cria outras formas similares. “The key point of IFS is that fractals, or self-similar forms in general, are attractors of a set of transformations, applied iteratively” (ibid.:67). Além de transformações de rotação e translação, os objetos são gerados com iterações que alteram a escala dos objetos (Figura 99). Esses motivos e padrões são adequados para o estudo de algoritmos em arquitetura especialmente para alunos nas fases iniciais do curso, pois abrangem conteúdos como a parametrização, simetria, regularidade, ordem e caos.

Figura 99. Hibridização de objetos.



Fonte: Corcuff, 2012.

A experiência em nível de mestrado do autor desta tese, também adapta a GF para o projeto. Sedrez e Pereira (2012) tratam da aplicação da GF no projeto de arquitetura, os autores recriam atividades para o ensino de arquitetura, fractais e CAAD. O processo de aprendizagem é destacado por meio da adoção da Taxonomia de Objetivos Educacionais de Bloom. A construção da forma ocorre com a criação de tramas reguladoras a partir de transformações fractais. As atividades projetuais em CAAD se baseiam nos exercícios propostos de maneira manual por Moisset (2003).

Rashad e Alfaris (2012) buscam estudar a implementação de um SG de projeto baseado no desempenho. Existem diversos SGs emprestados da matemática e ciências da computação estão aplicados na arquitetura: autômatos celulares, fractais e L-systems. A grande influência dos fractais na arquitetura está relacionada com a necessidade de



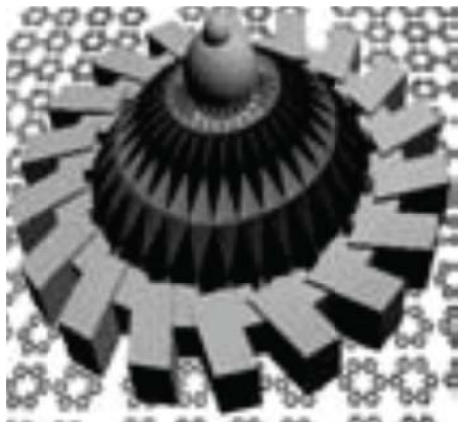
desenvolvimento de um processo de projeto mais **sistemático** (*IBID*). Apesar da experiência relatada no artigo ser interessante do ponto de vista da aplicação de algoritmos em um caso prático de projeto, não fica claro como a GF contribuiu para a construção do método.

Wang, Ma e Liu (2008, 2010) se propõe a calcular a dimensão fractal buscando harmonizar o novo objeto com o entorno. A investigação não tem uma grande contribuição na questão da forma, mas é interessante, pois usa tanto o processo *curdling* quanto o método de contagem de quadrados para determinar a dimensão fractal. Para os autores um modelo complexo, feito com elementos simples por meio de regras simples, pode adaptar-se para uma produção industrializada em massa, portanto tem forte aplicabilidade.

Wen, Liu e Wang (2009) usam a GF (L-system) como gramática de formas em CAD para a construção de padrões de desenho de piso e volumetrias para o edifício e um domus, e depois unem essas partes criando composições (**Figura 100**). Este estudo é inicial, porém adequado para estudantes explorarem os recursos computacionais. Lu (2010) explica como o jardim chinês é construído sob uma ordem complexa onde partes e subpartes tem semelhanças, relacionando com a GF. Essas aplicações são bem específicas e possíveis de serem replicadas e ajudam a entender como a GF pode gerar resultados arquitetônicos.

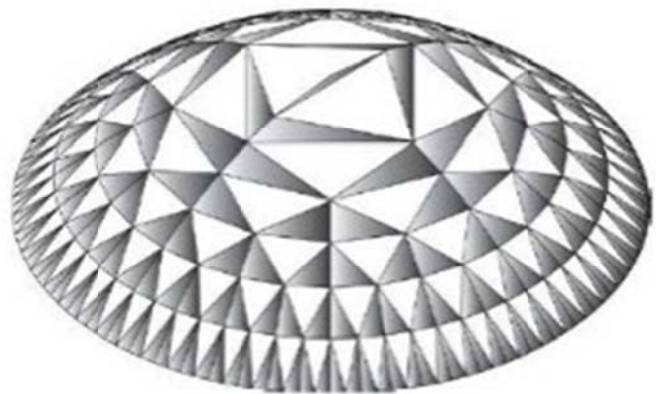
Outra aplicação específica é a de Vyzantiadou, Avdelas e Zafirooulos (2007), os autores explicam que os recentes avanços da tecnologia no projeto e na construção bem como a introdução de formas complexas têm levado a novas maneiras de projetar. Os autores propõe uma abordagem onde sistemas estruturais são criados usando fractais (**Figura 101**). A ideia é criar composições fractais sobre superfícies elípticas ou paraboloides e analisar o comportamento estrutural.

**Figura 100.** Projeto com união de partes.



Fonte: Wen, Liu, Wang, 2009.

**Figura 101.** Concha reticulada.

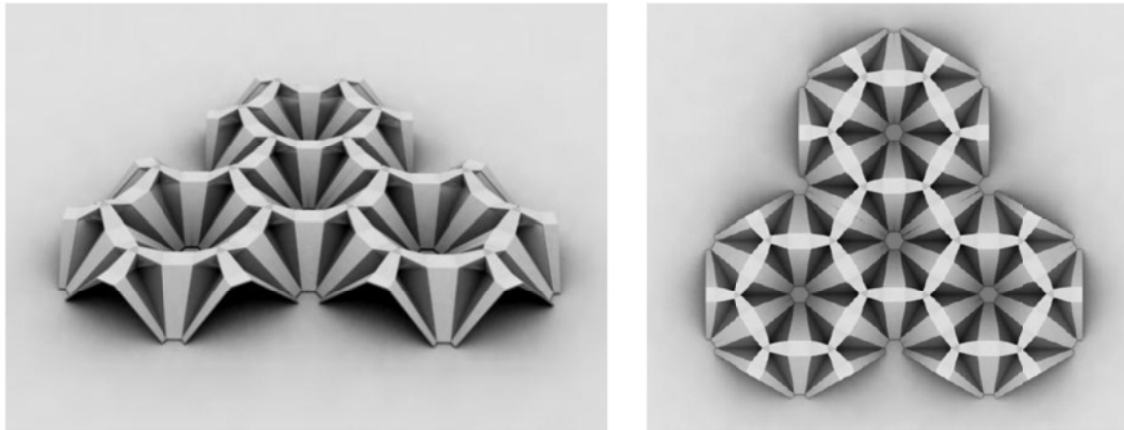


Fonte: Vyzantiadou, Avdelas, Zafirooulos, 2007.

A criação de estruturas também é o foco de Landreneau *et al.* (2006). Procurando dar maior controle aos arquitetos em processos generativos, eles misturam técnicas de criação

de fractais e L-systems com interatividade. O programa criado pelos autores faz a extrusão e junção de sólidos em vez de usar regras de substituição dos fractais (**Figura 102**). Essa aplicação é muito interessante do ponto de vista do projeto arquitetônico, permitindo uma visualização em 3D e parametrizada. O estudo considera o crescimento fractal, no entanto aplica somente em uma iteração nos resultados finais, mas está num bom direcionamento considerando questões construtivas e o foco nas possibilidades estruturais.

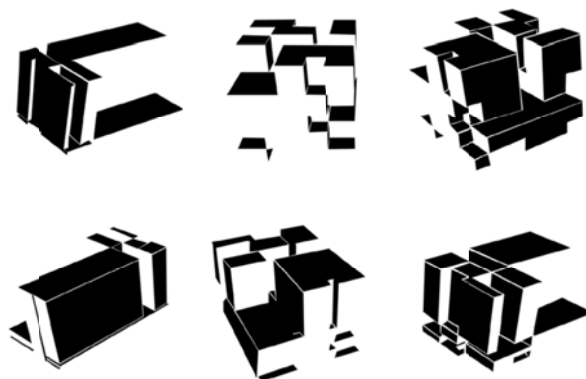
**Figura 102.** *Spatial conceptual structure.*



Fonte: Landreneau *et al.*, 2006.

Ediz (2009) faz uma indagação muito similar a desta tese: como os fractais podem ser usados no processo de projeto de arquitetura? Para responder o autor utiliza o conceito de improvisação oriundo da música. Cria o programa computacional generativo de formas CADaFED (*Computational Architectural Design approach based on Fractals at the Early Design*), citado anteriormente na seção 4.3.3, que utiliza a dimensão fractal calculada para formas 3D ou padrões 2D específicos. O resultado é a geração de opções volumétricas de acordo com um contexto (**Figura 103**).

**Figura 103.** Formas geradas pelo CADaFED.



Fonte: Ediz, 2009.

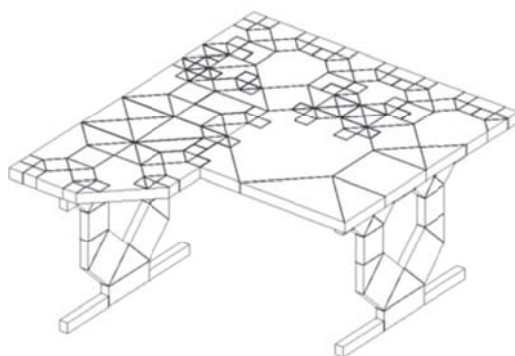
A ferramenta produz modelos abstratos para as fases iniciais do projeto. Ediz, Çagdas e Alaçam (2010) usam CADaFED em um *workshop* com alunos de arquitetura para geração de soluções para uma bairro com padrões tradicionais, ao final percebem os valores paramétricos inseridos similares geram resultados similares limitando o nível de criatividade.

As pesquisas apresentadas a seguir começam a trazer conceitos mais próximos aos abordados nesta tese. Os fractais realmente atuando no processo generativo do projeto, seja em 2D ou 3D. A programação é essencial para estas aplicações, sendo que a pesquisa de Tamke e Thompsen aproxima essa experimentação da fabricação digital.

Primeiramente Dantas (2010) por meio de programação em VBA para AutoCAD usa imagens fractais 2D como base para a geração de geometrias complexas em 3D. O processo consiste em transformar o código de cores da imagem em pontos no espaço. As imagens fractais são geradas por outro programa, apesar de integrar os fractais no processo de projeto, não controla as iterações ou o fractal parametricamente. Outra aplicação que não usa parametrização é proposta por Serrato-Combe (2005). Um aplicativo escrito em Java produz fractais que são exportados para um programa CAD e modificados posteriormente. A proposta é permitir aos arquitetos alternativas para gerar geometrias baseadas em L-systems. Em ambos os casos a GF atua como SG, possibilitando ao arquiteto certo controle das iterações.

De maneira ainda simples, Indraprastha, Sahputra e Suharjono (2013) utilizam a GF como SG de formas para a criação de ornamentos arquitetônicos indianos Aceh com o programa JBatik. Um padrão de pétalas ou ramos é gerado usando princípios de L-systems em seguida selecionado pelo usuário e transferido para um programa de CAAD. Patlakas (2014) também usa fractais como ornamento, mas de uma superfície plana. O estudo usa projeto paramétrico e fabricação digital para produzir um protótipo de conjunto de mesas cujos tampos são ornamentados com um padrão fractal.

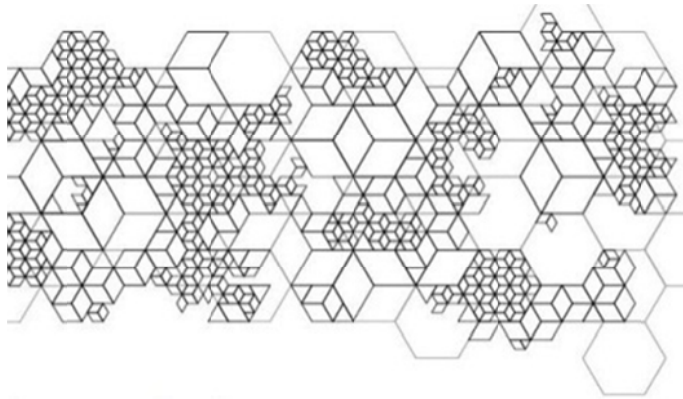
**Figura 104.** *Reading table.*



Fonte: Patlakas, 2014.

E finalmente Tamke e Thompsen (2009) elaboram um método de projeto para a exposição *It's a small world*. Usando painéis de alumínio composto para fachadas os autores exploram como novas técnicas digitais de manufatura nos permitem redefinir as propriedades estruturais e usos do material. A pesquisa mostra como um projeto específico e o ambiente de fabricação podem ser desenvolvidos. Os autores acreditam no surgimento de novas práticas colaborativas entre projeto arquitetônico, engenharia e fabricação. A ideia do projeto foi de estudar novas técnicas de fabricação e como o projeto pode ser desenvolvido (Figura 105, Figura 106). Um SG baseado em regras fractais foi criado para estabelecer formas no programa Generative Components.

**Figura 105.** Padrão recursivo.



Fonte: Tamke, Thompsen, 2009.

**Figura 106.** Objeto final.



Fonte: Tamke, Thompsen, 2009.

## 5 Novas tecnologias e fabricação digital

“*Show me what you build, and I will show you who you are*” John Ruskin.

Neste capítulo as novas tecnologias para o projeto são explicadas, com ênfase em *generative design*, projeto paramétrico e fabricação digital. Lévy (1999:28) explica no livro *Cibercultura* o que são as novas tecnologias:

*“Aquilo que identificamos, de forma grosseira, como “novas tecnologias” recobre na verdade a atividade multiforme de grupos humanos, um devir coletivo complexo que se cristaliza sobretudo em volta de objetos materiais, de programas de computador e de dispositivos de comunicação”.*

Na arquitetura as novas tecnologias podem ser: os programas CAAD, que têm se tornado mais avançados e flexíveis em termos de controle da forma; máquinas industriais, incorporadas na fabricação de objetos arquitetônicos (fresadoras, braços robóticos); e técnicas de impressão 3D.

Durante muito tempo os arquitetos tinham uma limitação, só podiam construir o que poderia ser medido. Mario Carpo (2011) chama essa dificuldade na representação do projeto de “*notational bottleneck*”. Gaudi tentou vencer esse problema ao não usar desenhos, mas controlando as etapas da construção da Sagrada Família como um artesão/escultor.

*“Early in the history of computer-aided design [...] architects started to realize that, even though a computer screen is two-dimensional, all three-dimensional forms visualized through it may exist in a computational three dimensional space right from the start. Regardless of the interfaces and the conventions chosen to represent them, all geometrical points controlled by recent 3D CAD or animation software are, at their root, a set of three coordinates that locate each point in a three-dimensional space. As a result, a coherent object designed on a computer screen is automatically measured and built informationally — and the computer can actually fabricate the same object for good, if necessary, via a suitable 3D printer” (IBID.:33).*

Essa inovação tecnológica dos últimos anos acarretou em inúmeras alterações em métodos e abordagens do projeto. Finalmente, a introdução de ferramentas CAAD no projeto de arquitetura ultrapassou os limites da representação gráfica. “*Now all that is digitally designed is, by definition and from the start, measured, hence geometrically defined and buildable*” (IBID.:34).

Segundo Oxman (2012), a tradição modernista de ensino de projeto enfatizava a forma e o espaço no início do processo criativo, enquanto as questões estruturais e ambientais

eram frequentemente deixadas para os engenheiros. No atual estágio de desenvolvimento das tecnologias de apoio ao projeto a disponibilidade de recursos de informática para a realização de análises ambientais e estruturais desde as primeiras etapas do projeto tem modificado essa realidade. Além de inúmeras possibilidades de SGs, atualmente existe disponível para os arquitetos um vasto número de programas de simulação de problemas arquitetônicos: ventilação, insolação, estrutura.

Os avanços nas novas tecnologias de projeto, análise e produção são importantes e tem produzido uma nova visão da arquitetura (KOLAREVIC, KLINGER, 2008). O uso de sistemas CAD em arquitetura vem se difundindo no Brasil desde os anos 80 (AMORIM, 1995). Contudo, existem poucos registros de métodos de ensino de projeto arquitetônico com práticas projetuais instrumentalizadas para o uso de CAD, como o projeto paramétrico. As novas abordagens do projeto arquitetônico buscam novos métodos imersos em ambientes computacionais, procuram expressar todo o processo cognitivo do projeto e não somente o resultado final, exploram o projeto paramétrico e usam programação para criar inter-relações entre objetos (TIDAFI, IORDANOVA, 2006). Dunn (2012:6) conclui:

*“The increasing proliferation of computers and advanced modelling software has enabled architects and students alike to conceive and construct designs that would be very difficult to develop using traditional methods. In particular, the emergence of new computational modelling software, which allows parametric design systems and complex 'biological' organizations to be generated and explored, offers, new avenues of holistic design production and detailed component manufacturing for the architectural designer”.*

A consequência da integração de mídias digitais no processo de projeto é a liberdade para com a definição da forma. A forma pode ser facilmente alterada por meio da manipulação dos parâmetros e cada alternativa pode ser testada, atendendo a demandas ambientais, ergonômicas, econômicas ou estruturais (MEREDITH, 2008). A escolha das formas e dos parâmetros irá depender fortemente da sensibilidade cognitiva do arquiteto. A forma emerge de um processo de procura pelo desempenho ótimo.

*“With advances in building technology and the influence of computers on the design process, a new world of architectural forms has opened up. These advances permit the use of more biomorphic forms that incorporate free-flowing curves in any or all traditional axes” (HARRIS, 2012:77).*

Como na arquitetura cada projeto é único, não é prudente gastar muito tempo e recursos na automação de um processo que será usado uma única vez, mas algumas partes da construção usam processos automatizados. Na arquitetura contemporânea observa-se a

emergência de projetos complexos e isso só é possível graças ao desenvolvimento da automação para arquitetura. Tibbits (2012) afirma que os fatores que contribuem para a complexidade na arquitetura são: “[t]he increasing power of design software, the widespread availability of digital fabrication and growing complexity of our built environment are in stark contrast to the inefficient techniques that currently plague the construction industry”., enfatizando um problema que é a falta de avanço na indústria da construção civil.

Hansmeyer (2010) explica sua visão:

*“Complexity is no longer an impediment to design and fabrication. Rather, it is an opportunity that is waiting to be explored. For years, information technology constrained architects. Arguably, this relationship has been reversed: it is now architects who are constraining the possibilities of information technology. To truly exploit the possibilities, we can no longer draw by mouse in CAD programs. Nor can we use parametric approaches that alter existing geometries rather than create genuinely new ones. What is needed is an abstract and open-ended method: a computational approach”.*

Ainda sobre a construção de formas complexas Kolarevic e Klinger (2008:7) afirmam:

*“In a dramatic departure from the formally and materially reductive norms of much twentieth-century architecture, it is now possible to materially realize complex geometric organizational ideas that were previously unattainable. Furthermore, in a paradoxical way, the new techniques and methods of digitally enabled making are reaffirming the long forgotten notions of craft, resulting from a desire to extract intrinsic qualities of material and deploy them for particular effect”.*

Abordar as novas tecnologias com um olhar para a construção de complexidade de formas é importante para esta tese, especialmente a complexidade sendo explorada para a produção de efeitos arquitetônicos (KOLAREVIC, KLINGER, 2008; MOUSSAVI, KUBO, 2006). Kolarevic e Klinger (2008:21) explicam “[i]t seems that the computational potential for generating complex forms and complexly patterned surfaces and structures is virtually inexhaustible”. Por fim, Mitchell (2005:41) afirma que a complexidade de formas na arquitetura contemporânea é “[...] a direct outcome of new conditions created by the digital revolution”.

### **Novas competências**

No projeto digital as habilidades cognitivas são despertadas pelo uso de ferramentas e recursos matemáticos e geométricos, como os algoritmos. Estes recursos podem servir como elemento articulador do problema em arquitetura, pois ajudam a resolver ou

organizar um problema de grande complexidade (TERZIDIS, 2006). É muito interessante que o estudante de arquitetura aprenda a fazer operações algorítmicas básicas de ordem “*arithmetical, logical, combinatorial, relational, and classificatory arranged under specific grammatical and syntactical rules*” (IBID.:38).

O projeto contemporâneo enfatiza a capacidade lógica do arquiteto de trabalhar os diferentes elementos geométricos necessários para a construção do raciocínio projetual com o auxílio da computação. Para Kolarevic (2003:26) “*new approaches to design open up a formal universe in which essentially curvilinear forms are not stable but may undergo variations, giving rise to new possibilities, i.e. the emergent form*”. As habilidades cognitivas de percepção do arquiteto são uma condicionante a ser explorada nos métodos contemporâneos de projeto, pois contribuem com a criação e a descoberta de soluções, formas, padrões. Assim, um método coerente com as ferramentas paramétricas, pode estimular o desenvolvimento de habilidades cognitivas de arquitetos imersos em um ambiente digital.

Atualmente diversos pesquisadores procuram descrever a recente incorporação das tecnologias digitais no processo de projeto. Algumas áreas de projeto generativo estão surgindo, como a geração de formas por meio de algoritmos e projeto paramétrico. O conteúdo conceitual, as metodologias experimentais e as habilidades digitais são os três principais elementos dos novos métodos de projeto digital, que devem ser integrados (OXMAN, 2008).

Meredith (2008:162-163) elenca quatro novas atividades do projeto arquitetônico contemporâneo que definem novos conhecimentos para os arquitetos.

- “1. *Organize the relation between the whole and its parts: parametric 3D-CAD models. [...] by organizing the immense amount of information in a parametric three-dimensional model a couple of thousand detailed plans could be generated automatically for any variant of the design chosen by the architect.*
2. *Optimize the whole depending on the interrelation among its parts: algorithmic optimization tools.*
3. *Simplify the parts: rationalizing the parts to realize the design. Architectural construction is all about the assembly of parts. And complex architecture consists of large numbers of individual parts.*
4. *Materialize information: production data for the parts. Non-standard geometries are built from non-standard parts. In a workshop, every single part has to be edited for the computer-aided machine –nesting parts on raw material, selecting tools, configuring the tool path and generating the machine code”.*



A profissão do arquiteto está em transformação, novas habilidades são necessárias. Outra variante são as novas profissões que têm surgido na arquitetura, desde técnico em tecnologia à especialista em renderização computadorizada, e os grupos de especialistas (programadores e matemáticos) dentro de grandes escritórios (CELANI *et al.*, 2015).

### **Projeto Paramétrico**

Para situar historicamente o projeto paramétrico, Woodbury (2010:7) explica:

*“[...] is an old idea, indeed one of the very first ideas in computer-aided design. In his 1963 PhD thesis, Ivan Sutherland was right in putting parametric change at the center of the Sketchpad system. [...] Parametric design] combines the basic ideas of parametric systems with equally basic ideas from both geometry and computer programming”.*

Projeto paramétrico (algorítmico) é um dos tópicos essenciais para a geração de formas complexas. Meredith (2008:6) afirma “[p]arametric design fits within an architectural discipline that is simultaneously searching for a unified organizational clarity (the diagram, parti, etc) and visual complexity [...]”. A complexidade é uma questão essencial no projeto paramétrico no qual a programação é uma ferramenta de auxílio à decisões. Kolarevic e Klinger (2008:27) explicam “[w]hile algorithms assist in the examination of complex strategies, human reasoning still governs the selection of appropriate input parameters for consideration”.

Dunn (2012:54) complementa a definição de projeto paramétrico:

*“[...] enables the designer to define relationships between elements or groups of elements, and to assign values or expressions to organize and control those definitions. It is usually applied within a three-dimensional CAD program. [...] Parametric design addresses the constraints of traditional CAD operations by supplanting the designer’s direct interaction with the design elements - adding, subtracting, copying, etc. - with the development of a series of relationships by which elements connect and build up the design”.*

As formas complexas podem ser avaliadas e alteradas com certa facilidade em um projeto parametrizado, como indica Lewis (2008:177) “[c]omplex shapes, forms and spaces can quickly be studied and test through an iterative sequence enable by modeling software [...]”. Este procedimento pode deixar o projeto a um passo da fabricação digital.

## Fabricação Digital

As novas tecnologias auxiliam o processo de projeto e também de construção (fabricação) oferecendo novos desafios à atividade de projeto. Cada vez mais o edifício vem sendo entendido de maneira industrializada: montagem de partes separadas produzidas individualmente. Por exemplo, existem empresas especializadas na produção de elementos para fachadas, outras em entregar o banheiro finalizado na obra. Isto permite a redução do cronograma de obras ao se fabricar partes do edifício simultaneamente. Iwamoto (2009:7) afirma: “[p]ractically speaking, because buildings are made from a series of parts, their assembly relies on techniques of aggregating and manipulating two-dimensional materials”.

Iwamoto (*ibid.*:5) descreve a maneira na qual os computadores estão presentes no processo de projeto do conceito à construção: “[t]hree-dimensional modeling and visualization, generative form finding, scripted modulation systems, structural and thermal analyses, project management and coordination, and file-to-factory production”. Observa-se a automação e a produção de praticamente qualquer produto físico disponível no mercado, de bicicletas a aviões. Esse processo de produção de muitas cópias idênticas do mesmo produto exige um investimento na automação. Para a arquitetura novos materiais e processos construtivos estão disponíveis e a união da estrutura com a “pele” do edifício é um dos conceitos mais explorados nos últimos anos (KOLAREVIC e KLINGER, 2008).

Dunn (2012:84) comenta sobre a manufatura digital:

*“Before the implementation of digital technologies, in particular CAD/CAM systems, the construction and assembly processes used in architecture were a direct consequence of industrial manufacturing and the logic of mass production and standardization. To be economically viable, building components made throughout the twentieth century were for the most part geometrically simple and limited in terms of type, since both geometrical complexity and variety typically resulted in exponential cost implications. This situation has been transformed through digital fabrication methods, wherein the multiplicity and complexity of design elements has no correlation to economies of efficiencies of production”.*

Atualmente existe a disponibilidade de novas tecnologias como máquinas CNC, braços robóticos, impressão 3D, máquinas de corte a laser e a plasma. Estes recursos são usados por diversos segmentos industriais e pouco explorados no Brasil na área de arquitetura. Na arquitetura geralmente são usados métodos de pré-fabricação de partes da construção. Elementos simples repetidos muitas vezes geram complexidade, elementos padronizados ou conexões padronizadas podem alcançar resultados complexos também.

Contudo, se um projeto tem formas únicas que não podem ser geradas por métodos antigos de construção, a solução é usar processos automatizados.

Dunn (2012:6) afirma:

*“In addition, the application of CAD technologies as part of the production of physical models and prototypes is becoming increasingly widespread through processes such as CAD/CAM (Computer-Aided Manufacture), Computer Numerical Control (CNC) milling and rapid prototyping”.*

Tanto o processo de elaborar o projeto quanto o processo de construí-lo podem ser automatizados por meio de máquinas CNC programadas para fazer diferentes ações. Com a mesma facilidade que seria programa-las para fazer ações iguais repetitivamente.

Kolarevic e Klinger (2008:122) afirmam que a fabricação digital deve estar presente nas fases iniciais do projeto:

*“While the digital techniques of parametric design have redefined the relationship between conception and representation, enabling the designers to carefully craft the formal outcomes through iterative processes, the technologies of digital fabrication have facilitated a closer investigation of material outcomes at the earliest stages of design”.*

Por outro lado, Iwamoto (2009:5) acredita que a fabricação digital se faz presente nas fases finais do processo:

*“Digital fabrication is often one of the final stages of this process, and it is very much what it sounds like: a way of making that uses digital data to control a fabrication process. Falling under the umbrella of computer-aided design and manufacturing (CAD/CAM), it relies on computer-driven machine tools to build or cut parts”.*

As transformações no processo de projeto e na construção dessa nova realidade são visíveis. Ainda que no Brasil esse ritmo de inovação seja em menor velocidade, acredita-se ser possível a inserção destas tecnologias. A elaboração de projetos complexos necessita da fabricação digital e essa dualidade tem produzido obras que frequentemente adotam uma nova maneira de entender o ornamento produzido digitalmente.

## 5.1 Projeto Generativo

“An interesting variation of shape grammars is that of fractal generative systems” Kostas Terzidis.

Um SG é a combinação de elementos capaz de gerar diversas soluções diferentes para uma composição. SGs são formados por regras que permitem múltiplas soluções, e a característica principal do projeto generativo é a exploração. De acordo com Tamke e Thomsen (2009:329)

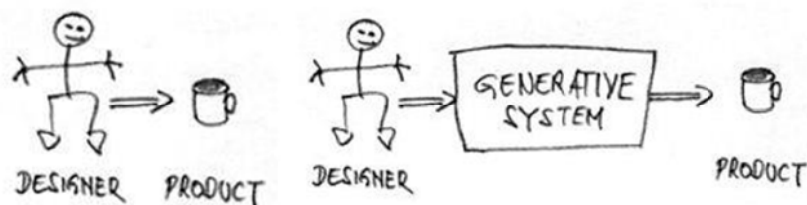
“Generative systems: These are all around us. They appear in nature as system that structure order and growth and emerge in the structure that governs our cities. As a design strategy generative systems are a means of managing complexity”.

Fischer e Herr (2001) complementam:

“Generative design is a design methodology that differs from other design approaches insofar that during the design process the designer does not interact with materials and products in a direct (“hands-on”) way but via a generative system”.

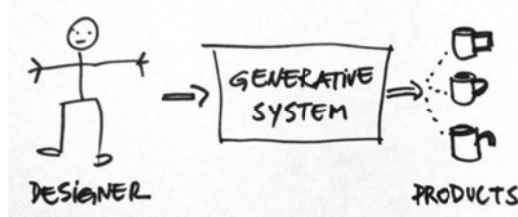
Além das gramáticas de formas existem diversos SGs, cujos conceitos derivam da matemática e computação: autômatos celulares e fractais, por exemplo. A aplicação destes SGs ocorre na arquitetura de maneira a prover soluções para um mesmo problema contando então com a análise por parte do arquiteto. Enquanto em processos tradicionais de projeto o arquiteto infere diretamente na solução, na abordagem com projeto generativo o arquiteto atua sobre o sistema que está gerando soluções (Figura 107). Em outra visão os SGs podem gerar uma família de soluções para um produto (Figura 108).

**Figura 107.** Abordagem tradicional do projeto e abordagem do projeto generativo.



Fonte: Fischer, Herr, 2001.

**Figura 108.** Abordagem dos SGs com múltiplas soluções.



Fonte: Adaptado de Fischer, Herr, 2001.

Fischer e Herr (*ibid.*) afirmam que os SGs são conhecidos por três características. A primeira é a geração de múltiplas soluções, o que permite analisar e estudar um projeto exaustivamente. A segunda é a possibilidade criativa despertada pelos SGs, o que é algo abstrato, mas pode ser considerado quando um grande número de soluções manipuladas promovem uma reflexão sobre o projeto. A terceira é a de que SGs podem selecionar os melhores projetos, o que é possível por meio de definições precisas de um problema. Grobman e Neuman (2011:11) explicam que as gramáticas de formas podem criar grande complexidade:

*“A method of this kind, such as “shape grammar”, may lead to a greater complexity of form, which will have to be given meaning during later stages of the design process while examining the way that the form fulfills the requirements of the various dimensions of performance”.*

Fischer e Herr (2001) e Fasoulaki (2008) afirmam que alguns conteúdos são importantes para a compreensão do projeto generativo: sistemas emergentes, auto organização (autômato celular, *swarm modelling*), gramáticas generativas (L-systems, gramáticas de formas), geração e crescimento algorítmico (**fractais**, projeto paramétrico), produção de algoritmos (algoritmos genéticos, processos seletivos). O mesmo pode ser confirmado em Rashad e Alfaris (2012) que explicam: “[i]n addition to Shape Grammars, there are currently a number of Generative Systems formalisms that have been borrowed from mathematics and computer science and applied within an architectural design context”, os autores citam autômatos celulares, **fractais** and L-systems. Rashad e Alfaris (2012) acrescentam “[t]he solution that a Generative System eventually provides can be evaluated and compared with other alternative solutions using an analysis system”.

A relação entre os SGs e a geometria é muito próxima, portanto a utilização de computadores para sua implementação é possível. Fischer e Herr (2001) argumentam: “generative design has good reasons to utilize mathematics, programming and computers and often involves digital toolmaking”. Esses recursos são fáceis de serem compreendidos e aplicados. É necessário, no entanto, o uso de programação como explicam Fischer e Herr (*ibid.*) “[w]hile the development of generative design systems usually requires programming skills their application can be comparatively user-friendly and easy for non-programmers”.

Uma das críticas aos SGs é a autoria do projeto. O paradoxo da Sala Chinesa, explicado por Terzidis (2008) com base na obra de Searle esclarece esse contexto. Em uma sala com uma mesa existem cartas com ideogramas chineses e um conjunto de regras para organizar as cartas. Uma pessoa que não fala chinês entra na sala e organiza as cartas. Então,

uma pessoa que fala chinês entra na sala e após ler as cartas dispostas afirma que é um poema belíssimo. Apenas um ser humano pode dar significado para as coisas. Uma máquina (pessoa que não fala chinês) se limita a organizar as cartas em uma das possíveis disposições possibilitadas pelas regras. Por mais avançadas que sejam as tecnologias ou programas computacionais ainda será função do arquiteto elaborar o projeto que esteja fundamentado em regras. Portanto são necessários alguns conhecimentos novos na formação dos arquitetos e assim surgem desafios de como incorporá-los no ensino de projeto.

Se por um lado os SGs podem contribuir para a criação de alternativas de projeto, por outro lado, há uma preocupação com o uso do computador em arquitetura. Ostwald (2010), pondera sobre essa questão:

*“Ultimately, if auto-generative design is to find a legitimate place in an architect’s creative vocabulary, then it must avoid overtly privileging the computer; it must not hide behind the ‘black box’ of the software or develop an equally concealing mask of bio-metaphorical cant. Most of all, it must apply due care not only in setting up the auto-generative system, but also in proposing, explaining, and demonstrating that an appropriate and rigorous assessment protocol exists to help the designer choose the optimal result from the myriad generated by the computer”.*

Os SGs de projeto ainda são um conteúdo recente, em 2001, Fischer e Herr percebem que havia pouco material introdutório. Em 2002, Herr ainda mantém a mesma postura, “[g]enerative design is still a relatively new approach to architecture”. Recentemente a compreensão dos SGs mudou e as aplicações em arquitetura estão mais comuns. Por exemplo, Rashad e Alfaris (2012:183) afirmam: “[f]ractal geometries and theories [...] also had a large influence on architecture within the twentieth century and specifically on the development of the concept of generative system in design”.

A presença dos SGs no projeto arquitetura pode ocorrer de duas maneiras como explica Fasoulaki (2008:7):

*“In general, two dominant design paradigms govern current digital design efforts in architecture: the Generative Design paradigm and the Performative Design paradigm. Generative design can be broadly defined as an algorithmic or rule-based process through which various potential design solutions can be created”.*

Stavric e Marina (2011:10) confirmam a possibilidade de uso de algoritmos na arquitetura contemporânea, influenciada pela tecnologia digital e pelo interesse dos arquitetos em abordar conteúdos de outras disciplinas:

*“On the one hand architectural design was inspired by the various possibilities of digital technology itself. On the other hand many*

*topics from different fields influenced the design. Former “invisible” mathematical and geometrical algorithms, forms and structures are now visible and spatial understandable for architects and, therefore, usable”.*

Um aspecto positivo explicado por Gips (1999:5) é de que a programação e as gramáticas de formas são estudadas em conjunto: “[a] *student learning to use shape grammars by using an interpreter program is learning both about shape grammars and how to use the program*”. Gips (1975) indica “[s]hape grammars can be used to define a number of classical mathematical curves”. Como aspectos lógicos e matemáticos estão presentes nos SGs sua implementação computacional é facilitada. Fischer e Herr (2001) afirmam:

*“Classic generative design methodologies such as space-filling curves, genetic algorithms, fractals and emergent behavioral systems have their roots in the realm of mathematics or have at least advanced to canonical exercises in that discipline”.*

Os métodos algorítmicos presentes nos SGs produzem formas com altos níveis de complexidade. Herr (2002:16.5) afirma “[a]fter a century of linearity and determinism in science and technology, the change of perspective on complex phenomena allows architects to reconsider growth processes in architecture, e.g. city development and building morphologies”. Mas para usar as formas complexas ou sistemas complexos os arquitetos necessitam de ferramentas e conhecimentos. As ferramentas são as técnicas de programação, a disponibilidade de programas e equipamentos de fabricação digital, e os conhecimentos, citados anteriormente, envolvem a habilidade de elaborar projetos com algoritmos. Outro facilitador é a programação visual em conjunto com programação textual: “Hoje há algumas linguagens de “quarta geração”, que permitem a criação de programas por meio do desenho de esquemas e manipulação de ícones na tela” (LÉVY, 1999: 42).

### **Matemática**

Segundo Salingeros (1999b) a relação entre arquitetura e matemática mudou no século XX, a formação matemática inadequada produziu uma incapacidade de interpretar padrões. Por outro lado, outras áreas de conhecimento continuaram a desenvolver e aplicar a matemática. Desde a segunda metade do século XX os sistemas complexos são estudados. Na última década, com o desenvolvimento do projeto paramétrico ou algorítmico, os arquitetos tem se dedicado a estudar a matemática com um novo olhar. Burry e Burry (2010) percebem essa nova fase da arquitetura contemporânea como uma reanimação das relações entre arquitetura e matemática. Isto tem exigido dos arquitetos conhecimento de matemática, geometria e padrões de uma forma mais avançada.

Stravic e Marina (2011) também acreditam que a matemática desempenha um papel fundamental no processo de projeto contemporâneo: “[i]n the age of digital parametric non-standard architecture, mathematics and geometry represent the core of the architectural design process”. O conhecimento da matemática e da geometria necessário é bastante amplo e inclui procedimentos recursivos presentes nos fractais. Bovill (2000) acrescenta que a GF pode ser importante para o projeto de arquitetura: “[...] knowledge of the mathematics of fractal geometry can provide a path to an even deeper expression”.

Neves, Rocha e Duarte (2014) sugerem que é importante concentrar a atenção de estudantes na elaboração de regras, como os fractais, como na experiência de Maldonado:

*“In particular, Maldonado’s course attempted to incorporate mathematical knowledge into design, elaborating on early versions of fractals such as the Sierpinski Triangle, the Peano or Hilbert Curve, which expressed the tension between the finite and the infinite [...]. Instead of focusing on the design and development of specific and finite forms, students sought to exploit the definition of geometric design rules to control the generation of form(s). The exercises involving geometric patterns were clear examples of this system-based approach. They show how students think about a set of variation rules for a given geometric module and subsequently conceive of geometric patterns in which the module is no longer a fixed and repetitive entity, but instead an element that varies geometrically in each instance”.*

Para Burry e Burry (2010) “[a]rchitecture has been concerned with the creation of space; mathematics with its description and definition”, portanto a exploração de recursos matemáticos para descrever objetos em arquitetura precisa estar voltada para a criação de espaço. De acordo com Fischer e Herr (2001), o ensino do projeto generativo demanda competências específicas que precisam ser introduzidas ao longo do curso, como o conhecimento de linguagens de programação e da teoria de SGs de projeto.



## 6 Materiais e métodos

Esta pesquisa de caráter exploratório está construída sobre o quadro teórico estudado nos capítulos anteriores. O primeiro método utilizado é a revisão da literatura sobre o tema, elaborada com o objetivo de fornecer dados para a construção da tese de que a GF contribui como SG na arquitetura, consolidando a **primeira etapa** da pesquisa. Os métodos utilizados são o *mapping study* descrito na seção 4.3 e a pesquisa bibliográfica apresentada nos demais capítulos (2, 3, 4 e 5).

A **segunda etapa** da pesquisa envolveu entrevistas semiestruturadas e estruturadas realizadas por diferentes meios: pessoalmente (voz gravada), video conferência (voz gravada) e por correio eletrônico. As perguntas tratam dos temas principais da tese: Fractais e Arquitetura, Complexidade, Fabricação Digital, Projeto Computacional, SGs e Ornamento. As entrevistas estão categorizadas em quatro grupos:

1. aspectos teóricos de fractais em arquitetura, Michael Ostwald, Inés Moisset e James Harris;
2. aspectos práticos da fabricação digital e projeto computacional, Anne Save de Beurecueil, Arnold Walz, Michael Hansmeyer;
3. contexto brasileiro (projeto e produção), Daniel Corsi e Guto Requena;
4. contexto internacional (projeto e produção), Caroline Bos, Pieter Scheurs, Florian Gauss e Howard e Mark Raggatt.

A **terceira etapa** da pesquisa é a realização de aplicações de fractais no projeto utilizando como método a pesquisa-ação (investigar fazendo, explorando). Diversos exercícios de aplicação são elaborados: a implementação computacional de fractais com programação textual (VBA e Python) e visual (Grasshopper).

Em seguida, aplicações em projeto são estudadas. Dois exercícios de projeto são elaborados: colunas fractais com programação em Grasshopper voltada para o ensino de fractais, e projeto de aplicação da GF para solução de uma fachada. Por fim, é criado o código para solucionar quatro projetos existentes. Os dois primeiros projetos são recriados a partir das informações disponíveis na revisão bibliográfica e entrevista. Os dois últimos, cujos arquitetos não usaram programação em sua concepção, têm seus códigos gerados a partir das informações passadas pelos arquitetos: Daniel Corsi e Vanessa Carlow. As tecnologias de fabricação e prototipagem como cortadora a laser, máquina CNC e impressora 3D do LAPAC, bem os programas Rhinoceros, Grasshopper, Python, AutoCAD e VBA são instrumentos para estas aplicações.

## 7 Entrevistas

“You have many questions, [...] some of my answers you will understand, and some of them you will not” The Architect (Matrix).

Neste capítulo as entrevistas são analisadas buscando informações que indiquem a maneira como a complexidade pode ser gerada na arquitetura. Algumas dessas entrevistas estão publicadas na íntegra (neste caso a referência é citada ao longo deste capítulo). As que ainda não foram divulgadas farão parte de um livro de entrevistas em conjunto com outras entrevistas realizadas por Gabriela Celani.

Os três primeiros entrevistados são autores de livros sobre fractais e arquitetura. Michael Ostwald é o autor do livro *Fractal Architecture*, este pesquisador possui também diversos artigos que explicam a dimensão fractal de obras de diferentes arquitetos. Em seu livro uma importante crítica é feita a arquitetura com aspectos fractais. A entrevista com Inés Moisset, autora do livro *Fractales y Arquitectura*, busca entender alguns dos posicionamentos da autora, buscando uma relação com a atualidade. James Harris, autor do livro *Fractal Architecture*, o qual apresenta uma abordagem generativa de fractais usando programação. O autor justifica seu método com a criação de formas naturais, aspecto que estaria embutido no processo generativo de fractais. O paralelo que o autor faz com arquitetura modernista é uma questão discutida na entrevista.

Em seguida, os entrevistados são selecionados por sua atividade prática no cenário nacional e internacional. As duas primeiras entrevistas consideram aspectos acadêmicos no caso de Anne Save de Beaurecueil e aspectos da indústria no caso de Arnold Walz. Anne Save de Beaurecueil responde sobre o ensino de novas tecnologias para arquitetura, em especial a necessidade de métodos contemporâneos para abordar estes conteúdos. Destaca-se sua experiência prévia que resultou em seu direcionamento de projeto e ensino. Arnold Walz trabalha na empresa *designtoproduction* que é especializada em fabricação digital de formas complexas. Priorizou-se uma conversa sobre aspectos práticos da indústria internacional. E a terceira entrevista é com Michael Hansmeyer que tem um histórico de pesquisa com projeto utilizando processos generativos, mais recentemente apresentou um ambiente gerado com recursividade e produzido com impressão 3D de areia.

Dois arquitetos brasileiros são entrevistados, o primeiro, Corsi Hirano, é um dos únicos que produziu um projeto com GF no Brasil; o segundo, Guto Requena é o arquiteto brasileiro que mais tem investigado projeto computacional, cujo reconhecimento tem sido internacional. Daniel Corsi e Dani Hirano são os arquitetos que venceram o concurso para o

Museu de Ciências da Unicamp, no qual a fachada foi elaborada com GF como um processo generativo. Nesta conversa se discute a fabricação digital de complexidade e a GF como SG. Guto Requena é um dos arquitetos brasileiros mais envolvidos com a fabricação digital em seus projetos. Na entrevista percebe-se como ele tem adotado métodos generativos de projeto e alternativas para a produção das formas desde métodos artesanais até impressão 3D.

Quatro profissionais internacionais são entrevistados, a arquiteta Caroline Bos do UNStudio em Amsterdam, o arquiteto Pieter Scheurs do ONL em Rotterdam, o engenheiro Florian Gauss do Teuffell Engineering em Stuttgart, e Mark e Howard Raggatt do ARM em Melbourne. Caroline Bos fala das práticas adotadas no escritório e comenta sobre como abordam o novo ornamento em seus projetos. Pieter Scheurs explica como desenvolvem projetos de grande complexidade, a partir de processos computacionais direcionados para a fabricação digital. O engenheiro Florian Gauss detalha o projeto Grand Egyptian Museum dos arquitetos Heneghan Peng cuja fachada foi elaborada com GF, e o processo de fabricação digital do projeto Heydar Aliyev Center de Zaha Hadid. Por fim, Mark and Howard Raggatt falam sobre seus conceitos de projeto e o uso de novas tecnologias na elaboração e fabricação de arquitetura.

## 7.1 Entrevista Michael Ostwald

Esta seção analisa a entrevista com o arquiteto Michael Ostwald, que é professor da universidade de Newcastle na Austrália e pesquisa dentre diversos assuntos como o projeto digital e a conexão entre GF e arquitetura. Em 2001 ele publicou o artigo *Fractal Architecture - the late twentieth connections between architecture and fractal geometry*, no qual explica o surgimento na década de 80 da “arquitetura fractal” e seu declínio na década de 90. No ano de 2009, Ostwald publicou o livro *Fractal Architecture*, uma crítica ao modo como os arquitetos têm se apropriado dos fractais nas últimas décadas e como essa relação entre matemática, complexidade e arquitetura se formou e se transformou.

### **Uso de fractais na arquitetura**

Tanto em seu livro quanto em seu artigo, Ostwald identifica arquitetos cujos projetos são de alguma maneira inspirados por fractais. A arquitetura com aspectos fractais na década de 80 era produzida sob a ótica pós-modernista; os arquitetos buscavam incorporar conceitos da Teoria da Complexidade e alternativas para os padrões regulares do modernismo, e até mesmo sob uma visão desconstrutivista. Contudo, as arquiteturas pós-modernista e desconstrutivista, apesar de mostrarem evidências do uso do termo fractal, muitas vezes tinham pouca relação com a geometria em si. Ostwald (2009) acredita que os arquitetos tinham uma lógica de apropriação pouco adequada, na qual os fractais serviam apenas como uma maneira de legitimar o uso de formas intrincadas no projeto, por sua conexão com a Teoria da Complexidade e com Teoria do Caos.

### **Ressurgimento de fractais na arquitetura**

Recentes trabalhos evidenciam a existência de uma nova forma de apropriação dos fractais pelos arquitetos, por exemplo, o projeto do Louvre Abu-Dhabi de Jean Nouvel de 2007 e o Grand Egyptian Museum de Heneghan Peng de 2003. Esta recente utilização de fractais na ornamentação de superfícies, se apoia nas novas tecnologias para o projeto: facilidade em programar com recursos visuais e fabricação digital. Alguns arquitetos utilizam a GF como SG; incluindo, muitas vezes, gráficos detalhados do processo. Porém, o nível de abstração da forma dos fractais presentes nos projetos varia. Ostwald (2014) concorda que realmente tem havido um aumento de projetos de arquitetura com fractais, o que comprova o interesse dos arquitetos pelo tema:

*"While the number of seemingly fractalesque designs being produced each year has grown, and that might be a sign of heightened levels of interest, the way in which these designs use geometry has not changed"*.

Contudo, a compreensão da GF pela maioria dos arquitetos ainda é limitada; para Ostwald (*ibid.*) não houve uma evolução do projeto com fractais: *"In summary, there is a growth in fractally inspired design today, but I don't see any deep conceptual difference between the new work and that which was undertaken two decades ago"*.

Mais de trinta anos após Mandelbrot ter escrito sobre fractais, é concebível que este conhecimento tenha se disseminado entre os arquitetos de alguma maneira. O ressurgimento dos fractais na arquitetura atualmente pode estar associado ao uso de novas metodologias para o projeto, como gramáticas de formas e SGs. Além disso, os fractais são frequentemente associados ao uso da programação, em especial quando se fala em funções recursivas. O uso de *scripts* para automatizar a geração de formas em sistemas gráficos, recentemente, tem sido um tema de grande interesse por parte dos arquitetos.

### **Motivação para o uso fractais**

As curvas que preenchem espaço (*plane-filling* ou *space-filling curves*) são reconhecidas em alguns fractais primitivos, embora a maioria dos fractais possua qualidade semelhante. Exemplos clássicos dessa propriedade fractal são a curva de Peano e a curva de Hilbert, cuja característica é a ideia de uma curva contínua infinita.

Ostwald (*ibid.*) enfatiza o uso destas curvas para a criação de padrões:

*"There is some truth to the fact that repetitive structural, cladding and lighting systems work best in such cases, and thus plane-filling geometries can indeed be readily appropriated for this purpose [...]"*.

Essas curvas possibilitam o preenchimento e a ornamentação de superfícies. Em alguns dos projetos citados abaixo elas permitiram aos arquitetos usarem a ornamentação como elemento climático, controlando a passagem de luz, permitindo ventilação, etc. Alguns projetos indicados nas perguntas são exemplos desta aplicação: Louvre Abu Dhabi (Jean Nouvel), Storey Hall (ARM), Victoria and Albert Museum Extension (Libeskind), Saint Cyprien Auditorium (Serero), Busan Opera House (PATTERNS), KAFD Conference Center (SOM), Egyptian Museum (Heneghan Peng), Museu de Ciências (Corsi Hirano). Ostwald (*ibid.*) afirma que em alguns desses casos a GF era conveniente para as especificidades do projeto:

*"[...] I quite like a few of the examples cited (like the Saint Cyprien Auditorium and Peng's Egyptian Museum), they all appear to conform*

*to the themes of motivation by legitimization or accommodation; being a convenient geometry for the architect's purpose".*

Ostwald critica o uso de parametrização na criação de fractais. Para ele (*ibid.*) os arquitetos acabam usando a GF sem qualquer conhecimento sobre o assunto, sem saber como os fractais são formados:

*"The task of setting up a parametric script to generate a fractal is relatively straight forward, almost too easy because it can be done without having any knowledge about what fractals really are, what variations are most appropriate for difference purpose".*

No Brasil sabe-se que os arquitetos têm pouca ou nenhuma informação sobre GF em sua formação. Sedrez (2009) pesquisa no estado de Santa Catarina quais faculdades de arquitetura ensinavam GF, mas o conteúdo ainda não era parte do currículo em nenhuma faculdade no ano de 2009. Ou seja, é necessário aprofundar o estudo do conceito de fractais na arquitetura. Outra abordagem seria a utilização das tecnologias disponíveis para criar arquitetura com fractais de maneira mais inventiva, como explica Ostwald (2014):

*"At the end of all of this extensive effort, using manual techniques to create fractalesque forms, it might have been thought that the advent of powerful computer modeling techniques would allow architects to finally use fractals in more inventive ways".*

### **Fabricação Digital**

Ostwald (*ibid.*) também critica o uso de fractais de forma ornamental quando é de certa maneira limitado:

*"In recent years architects have continued to use topographic tilings, isoperimetrics, soap-bubbles, micro-folds, string theory and fractals for inspiration, but the end result is typically limited to decorative applications or form-making exercises".*

Por outro lado, alguns arquitetos contemporâneos usam a ornamentação como um recurso resultante do projeto auxiliado pela fabricação digital, com o intuito para explorar uma nova estética. Uma transição do projeto digital tradicional, que era usado basicamente para representação, para o projeto computacional ocorre atualmente com a inserção de novas tecnologias (parametrização, manufatura digital). É natural que haja um período de acomodação do que é novidade para uma abordagem mais madura. Mesmo assim, o fato de usar a GF como um exercício para criar formas não diminui o valor do processo, pois a arquitetura resultante irá depender de outras habilidades do arquiteto. Ostwald (*ibid.*) afirma que o sucesso de alguns projetos de Jean Nouvell estão mais ligados ao conhecimento do uso da luz do arquiteto do que o uso de fractais.

Oswald (*ibid.*) acredita que a modelagem paramétrica não manteve o interesse dos arquitetos nos fractais: "[u]nfortunately, the next development of CAD was parametric modeling, and instead of retaining any interest in fractals [...]". Um exemplo positivo de como a parametrização adota componentes recursivos e fractais são os trabalhos produzidos com *scriptings* pelo arquiteto Marc Fornes. Oswald (*ibid.*) acrescenta: "[m]y feeling is that the rise of parametric modeling generally undermined the potential for a deeper application of fractal form in architecture". Esta tese serve como demonstrativo de que o interesse em algoritmos recursivos e fractais se ampliou, servindo como uma das alternativas para o aprendizado do projeto paramétrico.

Oswald (*ibid.*) tem simpatia e respeito pela arquitetura dos anos 90 gerada com fractais, conceitualmente rica, mas segundo ele geometricamente limitada. Nesta parte ele enfatiza que projetos como RMIT Storey Hall e Federation Square foram projetados manualmente, e o computador foi usado para documentação. Oswald (*ibid.*) acredita que a geração seguinte de programas CAD (paramétricos) levou os arquitetos a serem "seduzidos" pelas formas livres (*free-forms, biomorphics*) e o interesse pelos fractais desapareceu. A GF e conhecimentos sobre recursividade também foram importantes para gerar formas livres. Woodburry, em *Elements of Parametric Design* (2010), explica que alguns padrões recursivos auxiliam na compreensão da parametrização: espirais, árvores e curvas que preenchem o espaço. De acordo com Woodburry (*ibid.*), alguns arquitetos simplesmente desistem de representar algumas estruturas por falta de conhecimento da recursividade.

### **Durabilidade**

Quanto à questão da durabilidade, levantada pelo próprio Oswald (2014), ele afirma haver duas tendências dos escritórios de arquitetura contemporâneos: *fashion-driven* e *substance-driven*. Na *fashion-driven*, os arquitetos produzem seus projetos com as últimas novidades, seguindo um mercado que se renova constantemente tanto na questão dos materiais quanto em técnicas construtivas e métodos de projeto. Esses arquitetos mudam constantemente de estilo para acompanhar o mercado. Na *substance-driven*, os arquitetos ignoram as tendências, preocupando-se em criar uma arquitetura singular. Não há uma garantia de sucesso profissional, pois os clientes querem consumir tendências. Mas o produto final é um produto arquitetônico de qualidade que tende a durar mais.

Em sua conclusão final, Oswald (*ibid.*) mantém uma esperança nas possibilidades da "arquitetura fractal" que vão além de uma tendência passageira:

*"My hope is still that some substance-driven firms will maintain a long term interest in fractals – not abandoning them every-time minimalism is heralded as the 'new black' – and in their work at least, a more productive outcome will eventually be proposed, constructed and inhabited by people who truly love it".*

A efemeridade é um questionamento que os arquitetos devem sempre estar preocupados, e não está presente somente no uso de geometrias, mas na arquitetura contemporânea como um todo. É uma característica da sociedade hipermodernista a preocupação com o presente, com o momento. Questionamentos sobre a durabilidade física e a durabilidade estética do projeto sempre irão existir, pois são em parte a essência da arquitetura. Isso leva a uma reflexão de quanto tempo deve durar ou resistir um prédio, como explicou Arnold Walz (2014): "[v]ocê constrói uma casa e, 10 ou 15 anos depois, todos dizem vamos construir algo novo. Ou nós deveríamos tentar desenvolver um estilo de arquitetura com melhor qualidade, que tenha a chance de durar algumas gerações?".

### **Arquitetura com aspectos fractais hoje**

Segundo o discurso de Ostwald parece haver necessidade de uma aplicação dos fractais na arquitetura com uma consideração maior. *"The relationship between architecture and geometry in the majority of these recent cases appears to be one of convenience not respect"* (OSTWALD, 2014). Por outro lado, em seu livro, os exemplos de arquitetura com aspectos fractais que ele considera como 'ícones da complexidade' em sua maioria são experimentações, sendo alguns deles impossíveis de serem construídos.

O único projeto construído, citado por Ostwald, que parece ter sido bem sucedido ao relacionar os fractais com uma visão do universo e do cosmos é o de Charles Correa, Centro para Astronomia e Astrofísica. Coincidentemente, outro projeto de Charles Correa, a vila Belapur que adota um padrão de crescimento fractal em sua implantação também é um bom exemplo da aplicação de recursos fractais, mas não é citado por Ostwald. Aparentemente, na opinião de Ostwald, os arquitetos contemporâneos têm feito tentativas de tradução dos fractais para a arquitetura, mas ainda não alcançaram um nível satisfatório de projeto.

Ostwald (*ibid.*) comenta três erros comuns que podem causar essa desvalorização do projeto:

*"For most designers the first mistake is related to their underlying motivation. [...] The second problem relates to the issue of scale. [...] The third problem is the belief that using fractals somehow makes a building more natural or more sustainable".*



Referente ao terceiro problema, o fato de utilizar fractais no projeto não irá produzir um projeto sustentável, apesar de alguns arquitetos relacionarem seus projetos com fractais e sustentabilidade. No primeiro problema, Ostwald questiona a motivação dos arquitetos ao usarem uma geometria em projeto. As metáforas, muito presentes no período pós-modernista, sempre fizeram parte da arquitetura. O significado atribuído ao projeto é um fator muito considerado pelos arquitetos e a geometria pode ser uma maneira de traduzir conceitos para a arquitetura. Como Ostwald (*ibid.*) coloca, existe a possibilidade da geometria ser útil e aplicável:

*“What is the motivation for using any geometric system in a design? If the motivation is worthwhile, reasonable or at the very least honest, then there is a chance that the geometry will be usefully and openly applied”.*

A preocupação de Ostwald (*ibid.*) é a de que arquitetos geralmente fazem um uso trivial da ferramenta: “[...] *pick up ready-made geometries and use them, discarding those facets that do not have an immediate purpose in favor of their superficial imagery*”. Por fim, o segundo problema, referente à escala dos fractais em arquitetura, é realmente um ponto onde há um consenso: não é possível construir um objeto fractal *per se*. Apesar de que formas fractais são encontradas na natureza, como o pulmão humano, por exemplo, mas com uma variação de escalas até o nível celular. Toda arquitetura construída pelos seres humanos também tem uma variação de escalas que é finita, e de tal maneira o conceito de “arquitetura fractal” é abstrato. Ostwald (*ibid.*) conclui: “[t]he task of constructing a habitable space (not just a sculpture) from fractal forms is much more complex. For one thing, fractals don’t have any innate gravitational response or properties [...]”.

## 7.2 Entrevista Inês Moisset

A realização de uma conversa com a arquiteta Inês é de grande interesse para o estudo dos fractais. O livro *Fractales e Arquitectura* (2003) é um bom exemplo da utilização de fractais em arquitetura e possui experiências projetuais significativas com resultados bastante diferenciados; e traz uma compreensão de Fractais e Complexidade muito apropriada para estudantes em fases iniciais. Essas experiências foram traduzidas para o projeto por computador na dissertação de Sedrez (2009). Na entrevista realizada, ela explica como surgiu seu estudo com fractais, primeiramente influenciada por processos generativos, e com o auxílio de um de seus irmãos começou a programar em um computador.

*“Fuimos armando un pequeño software donde incluimos variables de dimensiones, ángulos y colores. Al principio eran dibujos bidimensionales, pero cuando se los mostré al profesor César Naselli, me incentivó para ver qué había más allá”* (MOISSET, 2014).

A programação pode auxiliar um arquiteto a ter uma visão diferente da construção de formas, suas relações e possibilidades generativas. Ao comentar sobre as qualidades da geometria ela destaca a possibilidade de gerar formas complexas a partir de códigos simples e acrescenta: “[a]demás de la posibilidad de pensar una arquitectura vinculada más a territorios o paisajes naturales, utilizando geometrías propias” (*ibid.*).

### **Ensino**

Moisset destaca a compreensão do projeto como um todo complexo, no qual a geração de formas similares em diferentes escalas permite ao arquiteto produzir uma arquitetura inserida em um contexto.

*“En estos casos, se trabajó la geometría fractal en particular para definir proyecto y territorio al mismo tiempo, a diferencia de otros procesos de diseño que se centran en el objeto o que implican insertar un objeto arquitectónico en un territorio. La comprensión de la complejidad del lugar es parte de la formalización de la propia arquitectura. Los fractales permiten ver paisaje y arquitectura partes de un mismo sistema”* (IBID.).

Na dissertação de Sedrez (2009), as experimentações originalmente feitas em técnicas de maquetaria por Moisset, foram elaboradas em computador. Após esta entrevista percebe-se que algumas técnicas computacionais foram usadas também por alunos de graduação de Inês em projetos posteriores a publicação do livro. A justificativa é de que o processo de aprendizagem com fractais é facilitado pela manipulação de objetos físicos, tal

qual SGs. Posteriormente se inicia a produção de formas com ferramentas digitais, quando os princípios básicos estão bem claros.

*“La producción manual es deseable al inicio del proceso de aprendizaje, cuando se está entrenando en el conocimiento de las reglas de generación. El trabajo a mano, que es más lento, brinda la posibilidad de tener tiempo para ir aprehendiendo los principios básicos. La producción con herramientas digitales, permite trabajar con formas de mayor complejidad, con niveles de interacción, experimentar, ver alternativas” (IBID.).*

Inês ensinou os conceitos de arquitetura e fractais na Argentina, no Brasil, na Bolívia e na Espanha, explicou que cada faculdade ou escola possui uma linha acadêmica curricular valorizando algum aspecto da arquitetura. A GF é um conteúdo que pode se adaptar a diferentes contextos curriculares.

*“Hay escuelas donde es importante la materialidad y esta geometría se ve puesta en juego con este tema. En otras será la integración con la ciudad, la funcionalidad, etc. Cada una interactúa con la geometría de maneras diferentes” (IBID.).*

Um sinal de que os conhecimentos adquiridos com essa geometria tem um amplo alcance no escopo do ensino de arquitetura. Os arquitetos podem estar motivados a usar a fractais como uma ferramenta de projeto, desde que conheçam seus potenciais e significados, e métodos eficientes de traduzir essa geometria para arquitetura. *“La geometría fractal ayuda a entender niveles de complejidad que otras geometrías no nos permitían... no es casual la relación entre la existencia de una arquitectura objetual y la geometría euclidiana” (IBID.).* Contudo, como explica Inês, é uma ferramenta que pode ser usada em conjunto com outras para produzir arquitetura. Vale lembrar que o produto deve ser coerente com a teoria aplicada, como explica Ostwald (2009).

### **Fabricação Digital**

O arquiteto contemporâneo possui agora tecnologias de projeto e produção disponíveis que estão aptas a produzir formas complexas. Quando há necessidade a construção de uma forma não convencional, a fabricação digital é fundamental para este processo. No Brasil ainda existem algumas barreiras a serem vencidas, mas a geração de arquitetos hoje formados fará uma pressão maior para utilização de métodos computacionais na construção. Moisset (2014) explica sobre a construção de formas complexas:

*“Es claramente una dificultad. [...] Es claro que los modos de construcción que tenemos son arcaicos y que se basan en la explotación de la mano de obra en muchos casos. Es una industria*

*que no ha avanzado a la par de otras porque se nutre de cierta "esclavitud" encubierta".*

Exemplos de arquitetura com aspectos fractais segundo Inês são os fractais em arquiteturas africanas do livro de Ron Eglash. Ela destaca um projeto (**Figura 109**): *“También se podría citar este proyecto [Embedded Project] en China que refiere a los tradicionales papeles plegados” (IBID.).*

**Figura 109.** Embedded Project, HDD FUN.

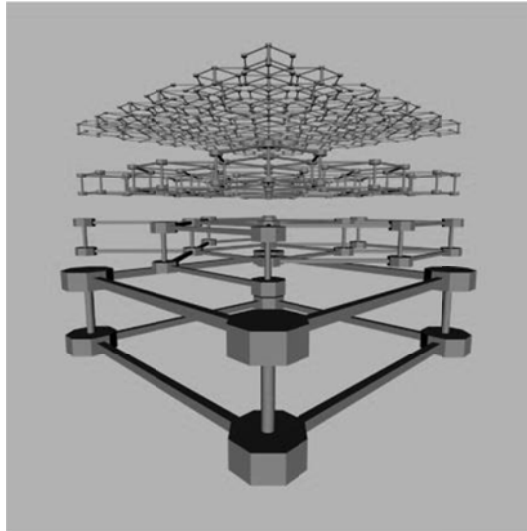


Fonte: Wang, Wang, 2009.

O interesse nos fractais continuou a despertar interesse; Inês, após 1998 ainda dá cursos sobre o tema até 2004. E em 2013 coloca disponível um blog com todo o material que não havia publicado sobre o assunto. Em 2014 encontra um arquiteto Peruano que fez seu mestrado sobre fractais e *tensegrity* baseado no livro dela. Em 2015 ela trata o tema em uma disciplina no doutorado da Universidad de Tucumán.

Na entrevista dois pontos estudados nesta tese são relatados, primeiramente, que o interesse contínuo na arquitetura com aspectos fractais, mesmo após tantos anos de seu surgimento ainda é recorrente. Segundo, a falta de profundidade com o qual alguns arquitetos exploraram a GF, questão que se percebe também no discurso de Ostwald (2009). Para finalizar Moisset (2014) explica sobre a fabricação digital e os fractais.

*“Desde ya que la fabricación digital es una de las grandes posibilidades. Igualmente no es garantía de buena arquitectura, ni el fractal ni la fabricación digital. Siempre está el arquitecto decidiendo, eligiendo opciones, seleccionando según valores. Se me ocurre así rápidamente la obra de Haresh Lalvani...” (Figura 110).*

**Figura 110.** Fractal truss.

Fonte: Lalvani, 2001.

Nem a fabricação digital nem os fractais, são garantias de uma boa arquitetura. Mas são ferramentas com potencialidades que podem ser exploradas pelos arquitetos. A boa arquitetura será resultante da integração de outros valores, como explica (HERSHBERGER, 1999), humanos, ambientais, culturais, tecnológicos, temporais, econômicos, estéticos e de segurança.

### 7.3 Entrevista James Harris

James Harris é o autor do livro *Fractal Architecture: organic design philosophy in theory and practice* (2012). O interesse em conversar com este arquiteto foi motivado pelos significativos resultados em sua publicação. Primeiramente se questiona sobre como ele aprendeu programação e *scripting*, e quais linguagens ele utiliza hoje em dia.

*“When I first started experimenting with fractal geometry I utilized a DOS based program that had a relatively easy user interface that did not require any programming. Eventually the operating systems moved past using DOS making that program obsolete. During this time I started using 3D Max (although it was called something else then) and learned that it had a scripting language called Maxscript. I taught myself how to use it and have used it ever since to generate fractal structures”* (HARRIS, 2015).

Sobre a necessidade dos arquitetos saberem programar, Harris (*ibid.*) explica: *“I think it is fundamental for any architect wishing to explore generative forms to understand and utilize programming”*. Harris concorda que é importante para a profissão do arquiteto explorar SGs e a situação ideal é por meio da programação.

A relação da arquitetura com a matemática foi o que despertou o interesse de James Harris para experimentar fractais na arquitetura. Como ele se formou em 1979, a GF ainda era algo muito novo, e somente nos anos 80 os arquitetos começaram a utilizar em projetos.

*“Ever since college I have been interested in the connection between mathematics and architecture. From the Golden Section, the Fibonacci series and Le Corbusier’s use of it to develop Le Modulor, I have been drawn to the idea that there is an inherent connection between man’s cognitive and emotional reaction to architecture and the mathematics on which it is based. During this search I came across fractal geometry and its basis for many of nature’s forms. It seemed intuitive to investigate its use to generate architectural form”* (IBID.).

Nos últimos dez anos o interesse por fractais na arquitetura ressurgiu, esta tese defende que foi em parte pelas possibilidades dos algoritmos e do projeto computacional e em parte pelo retorno do ornamento na arquitetura. Segundo Harris (*ibid.*): *“[t]he advent of incorporating algorithms in the design process is possibly the defining point in the development of generative architecture”*. Quanto ao ornamento ele afirma que pode ser resultado das iterações de um fractal: *““Ornament” can be obtained as the end product of a number of iterations. This ornament’s value is reflected on its ability to reflect the whole in its structure”* (*ibid.*). Nota-se que o arquiteto James Harris reconhece que o ornamento resultante

do processo generativo é algo relevante para a arquitetura. Em seus projetos pode-se observar que ele utilizou os fractais como SG e que o resultado apresentado possui qualidades de alguns movimentos arquitetônicos.

Harris faz uma relação com arquitetura modernista com sua aplicação de fractais em arquitetura. Vários autores afirmam que a arquitetura modernista não possui qualidades fractais (MANDELBROT, 1978; BOVILL, 2009; OSTWALD, 2009), apesar de Lorenz (2014) ter encontrado um certo nível de detalhe em diferentes escalas na arquitetura de Loos. Harris (2015) comenta o posicionamento, primeiramente, explicando: "[o]ne significant misconception that certain researchers and writers have is that a simple layering of details suffices to characterize a form as fractal". Por isso o método de contagem de quadrados pode ser uma ferramenta de análise, mas não caracteriza um edifício como fractal. Em seguida Harris (*ibid.*) apresenta sua motivação:

*“My discussion of modernism is at least in part due to the recognition that to be economically viable a fractal structure would most likely have to be within a modernist expression. By modernist expression I include most architectural expressions from the Bauhaus to present day. Benoît Mandelbrot similarly criticized modern architecture as lacking fractal qualities and cited the Paris Opera House as an example of architecture that exhibits a fractal quality. I doubt a structure such as the Paris Opera House could be built today and be economically viable. Unfortunately most structures if not economically viable do not get built. I believe that a modern architectural expression, as I defined modern architecture above, is a perfectly viable manifestation of a fractal structure. The key is the conscious or unconscious perception of a series of relationships between the layers of parts and the whole and vice a versa. It is this set of relationships that define an organic fractal expression, not the stylistic type”.*

A viabilidade econômica da produção da arquitetura levou o arquiteto a aproximar sua arquitetura fractal do modernismo. Se por um lado essa opção permite um convencimento do setor construtivo, por outro se limita a um ideal arquitetônico ao qual os arquitetos tem procurado ultrapassar. É possível atualmente construir estruturas de alta complexidade que sejam economicamente viáveis, quando se tem o suporte da fabricação digital. Por exemplo, a obra de conclusão da Catedral Sagrada Família de Gaudí, cujas estruturas complexas estão sendo finalizadas e fabricadas digitalmente. Mas essas experiências recentes de fabricação de complexidade ainda são raras.

Quanto ao método adotado, Harris (*ibid.*), aplicou o processo generativo fractal em edifícios de diferentes tipos, de residência (**Figura 111**) à prédio alto (**Figura 112**). *"The process I use involves a constant revision of the parameters until they gravitate to a solution*

*which I find gratifying*". Ele explica que o algoritmo permitiu que ele alterasse parâmetros até achar uma solução que o agradasse mais, portanto, gerar múltiplas alternativas. Isto fornece parâmetros que podem ajudar na construção das regras e na compreensão do estilo que ele usa como referência (Modernismo, Art deco, Frank Lloyd Wright e inspirado em Piet Mondrian). Pode-se fazer um paralelo com o trabalho de José Duarte (2007) ao descrever a gramática das casas de Álvaro Siza para a Malagueira. No caso de Harris é um pouco mais difícil, pois, além das regras do estilo arquitetônico, existem as regras geradoras dos fractais.

**Figura 111.** House #20.



Fonte: Harris, 2009.

**Figura 112.** Form #25.



Fonte: Harris, 2009.

Harris comenta sobre os desafios que enfrentou ao programar fractais para arquitetura. A falta de conhecimento em programação pode ser um problema para os arquitetos, pois, não saber uma linguagem cria bloqueios de comunicação entre o computador e a pessoa.

*“Not having any programming experience, the biggest challenge I had was dealing with syntax issues of 3d Max’s programming language, Maxscript. The lack of a period could stop you dead in the water without knowing what the issue is. I hired someone with Maxscript programming experience to review my scripts (algorithms) to see where the problem was. After a few of these I started to pick up on the syntax constraints” (IBID.).*

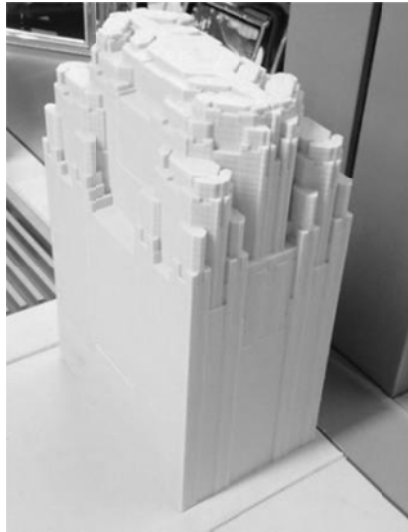
Harris relata uma dificuldade técnica ao utilizar uma impressora 3D, e que pretende fabricar modelos dos projetos que desenvolveu e como poderiam ser fabricado em escala real (Figura 113).

*“Subsequently to that the printer has experienced some difficulty which I am in the process of trying to fix. After I hopefully repair the problem, I plan on digitally fabricating most of the forms I have*



*developed. The façade panels can be easily fabricated in precast concrete” (IBID.).*

**Figura 113.** Modelo 3D.



Fonte: Harris, 2015.

Harris (2015), atua como arquiteto em Nova York e possui diversos projetos edificados nesta cidade, “[m]y career that I have pursued is the development and construction of high rises in New York City. In that respect generative systems are not utilized at all. It does position me to control the development of a fractal structure given the opportunity”. Contudo não teve a oportunidade de construir um de seus projetos com fractais: “[u]nfortunately I have not constructed any of my designs although I am still hopeful. Given the opportunity I am very well positioned to handle all of the issues taking it from concept to construction” (IBID.). Apesar de ter dedicado sua pesquisa aos fractais como SG: “[i]n my research it is almost exclusively devoted to generative systems in particular fractal based generative systems” (IBID.), Harris ainda está confiante na produção de arquitetura com fractais, visto seu interesse recente em novas tecnologias como a impressão 3D, o que possibilitaria a fabricação de formas complexas.

#### 7.4 Entrevista Anne Save de Beurecueil

A arquiteta Anne Save de Beurecueil atuou como professora na Architectural Association School, de Londres, e no Pratt Institute, em Nova Iorque. Atuou junto a profissionais conhecidos internacionalmente no âmbito profissional e acadêmico, tais como Bernard Tschumi, Zaha Hadid, Ken Yeang, entre outros. A entrevista completa encontra-se publicada na seção Entrevistas do Periódico Vitruvius – Beurecueil (2013).

Anne se graduou em arquitetura pela Cal Poly em San Luis Obispo, onde a sustentabilidade e o meio ambiente eram relevantes no ensino prático e teórico. Fez mestrado em Arquitetura Urbana em Paris, cujo foco era a “[...] *organização dos edifícios e dos espaços públicos na escala do quarteirão [...]*” (IBID.). Então iniciou mestrado na Columbia University, o que parece ter sido de grande importância na sua formação, pois teve:

*“[...] como professores Hani Rashid, Greg Lynn, Sulan Kolatan, Alejandro Zaera-Polo e Farshid Moussavi que nessa época eram sócios no FOA - Foreign Office Architects. Era um período de grandes inovações na Columbia, pois eram os primeiros anos dos paperless studios, onde tive contato com a arquitetura digital e a fabricação digital. Greg Lynn foi um dos pioneiros deste movimento, e tinha uma pesquisa muito produtiva na Columbia durante esta época, juntamente com os outros professores, como Jesse Reiser e Nanako Umemoto, Evan Douglas e William MacDonald. Nesse período, Alejandro e Farshid estavam construindo o terminal portuário de Yokohama, uma das primeiras manifestações físicas desse novo tipo de arquitetura” (IBID.).*

Anne trabalhou com a arquiteta Zaha Hadid, ela explica como foi essa experiência.

*“[...] A dinâmica de trabalho lembrava o ambiente acadêmico. Não havia muita hierarquia; era como uma professora com seus alunos, onde todos estavam envolvidos em fazer muitas opções de projeto. O trabalho era muito criativo. Obviamente a estética era muito importante. Zaha queria sempre estudar muitas opções para achar a melhor solução. Ao mesmo tempo ela sempre teve uma filosofia de criar uma organização fluida para o programa e a circulação” (IBID.).*

Ela também trabalhou com Ken Yeang, reconhecido por desenvolver arquitetura bio-climática, “[f]oi uma boa experiência em termos de arquitetura bio-climática, e pude trabalhar em todas as fases do projeto, desde o início até os desenhos executivos e a fase de construção” (IBID.).

A formação e a experiência da arquiteta contribuíram para a sua prática profissional e a maneira de entender e ensinar arquitetura. No artigo publicado na revista Pós

(FAUUSP), Celani e Sedrez (2014) abordam como o método de ensino da arquiteta Anne está embutido de conceitos pedagógicos contemporâneos.

### **Projeto Paramétrico**

Anne explica quais arquitetos influenciaram sua formação, no que diz respeito ao projeto computacional. São nomes conceituados no cenário arquitetônico mundial: Zaha Hadid, Greg Lynn, Alejandro Zaera-Polo, Bernard Tschumi. Mas o interessante desta trajetória é a maneira como ela agrupou estes conhecimentos. A seguir está um trecho da entrevista no qual ela conta sua formação.

*“Comecei usar modelos paramétricos na Columbia. Mas foi interessante que mesmo no escritório de Zaha, onde ainda desenhávamos a mão, já trabalhávamos usando uma mentalidade paramétrica na produção de múltiplas alternativas. Fazíamos séries de iterações com sequências de rotações, operações de escala e morphing, como se estivéssemos produzindo isso em um computador. Essas construções geométricas eram feitas com maquetes ou mesmo desenhando, fazendo essas operações de virar, mudar a escala, mover, repetir. É porque Zaha pensa assim; ela faz muitos croquis. Mas acho que este método de trabalho talvez venha da primeira formação dela, que era matemática. Ela insistia nessa questão de ser bem rígida em como pensar a geometria. Mas ainda não havia nada como hoje em dia, de ser tudo controlado pelo computador com scriptings ou modelos paramétricos. Por isso eu fiquei muito contente na Columbia, onde comecei a usar o computador para fazer o que já estava tentando fazer a mão.*

*As aulas de computação eram dadas por arquitetos [...], pois o José Sanchez já lecionava lá. Havia também alguns professores de arquitetura que usavam o software Maya. Greg Lynn, por exemplo. Alejandro Zaera-Polo usava o software AutoCAD, porém de uma maneira bem mais avançada, quase que paramétrica, com o edifício de Yokohama. Essa foi a primeira vez que usei elementos paramétricos, associando informações, números com formas e transformações geométricas.*

*No escritório de Bernard Tschumi usei o software Maya para gerar a geometria dos dois edifícios de um complexo de cinco edifícios novos para a Flórida Internacional University School of Architecture em Miami, usando wind dynamics e force fields para esculpir as formas. Foi uma experiência boa e aprendi muito, porque os edifícios foram construídos e eu acompanhei todo o processo do projeto e da construção.*

*Depois que trabalhei com Bernard, comecei a trabalhar com Franklin Lee em nosso escritório, SUBDV, fazendo trabalhos na China e no Brasil, usando desenhos paramétricos. Nessa época comecei a ensinar no Pratt Institute. Quando Bernard deixou o cargo de diretor em Columbia, muitos professores que estavam ligados à questão do parametric design foram para o Pratt. Por exemplo, Evan Douglass*

*que era um professor muito importante nos anos 1990 na Columbia, foi diretor do programa de graduação no Pratt. William MacDonald, outro professor muito importante na área de desenho, também se tornou diretor do programa de pós-graduação do Pratt, e posteriormente alguns de seus ex-alunos começaram a ensinar no Pratt. Ao menos três ou quatro professores todos os anos usavam desenho paramétrico; mas nem todos usavam esse método, é claro. Havia um grupo de professores usando softwares e conceitos computacionais. Nas apresentações de projetos convidamos duas ou três pessoas que entendiam o que estávamos fazendo, além de outros que faziam coisas totalmente diferentes, promovendo uma discussão. É muito importante associar o digital design ao contexto urbano, ao desempenho climático e a outros assuntos importantes para a boa arquitetura. Franklin e eu sempre fizemos essa ligação com os outros aspectos da arquitetura, particularmente com projetos sociais e com projetos bio-climáticos. Nós queríamos fazer arquitetura, trabalhar o programa. Não queríamos fazer apenas digital design. Dessa maneira, tínhamos assunto para discutir com os outros professores que não usavam necessariamente recursos digitais; havia diálogo com eles” (BEAURECUEIL, 2013).*

Anne detalha como está a situação na prática profissional do arquiteto quando perguntada: “[v]ocê acha que a falta de formação na maioria das escolas na área de fabricação digital, arquitetura paramétrica no Brasil, é um problema, uma dificuldade para depois ir para o mercado exterior?”

*“Sim, mesmo aqui, porque a construção é tão atrasada em comparação às outras indústrias brasileiras que são bem mais avançadas. Se os arquitetos não estiverem usando técnicas novas eles não vão pressionar a indústria de construção para mudar. Nós estamos fazendo um projeto agora e todo construtor que encontramos está tão fechado às novas tecnologias. Acabamos buscando pessoas que produzem barcos, pois eles são os únicos abertos, que entendem a nossa língua. Eles usam Rhino, eles fazem objetos paramétricos, usam superfícies curvas. Então acho que, para realmente avançar na construção, é preciso começar com os alunos, pois eles irão pressionar a indústria, irão inspirar a indústria. Isso ocorre em todo lugar. Na Inglaterra há muitas empresas que realmente podem fazer coisas mais complicadas, mas isso também começou com a demanda dos arquitetos, e hoje outros escritórios podem usar essas tecnologias mais avançadas. É muito importante incorporar essas novas tecnologias à cultura dos arquitetos; não pensar isso apenas como uma novidade, pois isso pode economizar muito tempo em termos de projeto, e dinheiro em um escritório. É uma maneira de avançar e de fazer coisas mais inovadoras, mais interessantes, não apenas repetir coisas que estão acontecendo lá fora. É preciso fazer essa fusão da arquitetura, da cultura brasileira com a nova tecnologia que vem de fora” (IBID.).*

Equipes multidisciplinares, que incluem profissionais de matemática, física, engenharia, arquitetura e computação, estão se tornando comuns no cenário internacional, por exemplo, os grupos Advanced Geometry Unit do escritório Arup, o Specialist Modelling Group do escritório Foster and Partners e o ZHA/CODE do escritório Zaha Hadid. Essa já era a realidade na prática profissional de Anne no ano de 2008, inclusive dentro da escola (A.A. School).

*“Dentro do Specialist Modeling Group (SMG) do escritório de Norman Foster. Havia, por exemplo, o Hugh Whitehead que começou o SMG, o Robert Aish, que criou o Generative Components, e o filho dele, Frank Aish, que ainda trabalha com o Norman Foster. A pessoa do SMG com quem trabalhamos era o Adam Davis, que estudou matemática antes e depois fez arquitetura no Institute of Architecture de Penn (University of Pennsylvania). Começamos com o Generative Components, mas depois o Grasshopper virou uma ferramenta importante nos anos de 2008-2009. Gostamos de Rhino, pois facilita a fabricação digital. Tudo começava no Generative Components, no Maya, mas tudo tinha de ser finalizado no Rhino. Com o Grasshopper podíamos fazer tudo no Rhino.*

*Uma coisa boa na A.A., que ajudou nossa pesquisa, foi trabalhar diretamente com engenheiros dos escritórios Buro Happold e Arup. Além disso, podíamos contar com pessoas do Specialist Modeling Group de Norman Foster, que ofereciam workshops de Generative Components. Nessa época, antes de 2008, algumas grandes empresas inglesas estavam colaborando muito com as universidades. Era uma maneira de desenvolver pesquisa” (IBID.:3).*

É possível perceber que o projeto contemporâneo necessita uma nova abordagem na formação dos arquitetos, maior conteúdo de geometria e matemática, ensino de projeto paramétrico associado a questões climáticas e urbanas, e atividades multidisciplinares e fabricação digital. Isso pode garantir aos arquitetos maior segurança ao projetar formas complexas e uma renovação da arquitetura no Brasil.

## 7.5 Entrevista Arnold Walz

Arnold Walz é arquiteto e sócio fundador da empresa *designtoproduction* gerenciando a sede do escritório em Stuttgart. Ele estudou arquitetura na Universidade de Stuttgart e foi um pioneiro no desenvolvimento de modelos CAD paramétricos para o planejamento da construção. Ele ajudou a melhorar o trabalho da mão de obra e a precisão na execução de alguns dos edifícios com grande complexidade nos últimos anos como o Museu Mercedes Benz em Stuttgart, Zentrum Paul Klee em Berna, P&C Weltstadthaus em Colônia, Museu Porsche, a Sede da Lufthansa Frankfurt entre outros. A entrevista completa encontra-se publicada na seção Entrevistas do Periódico Vitruvius – Walz (2014).

### Projeto

Walz (*ibid.*) explica o que é sua empresa, que é uma alternativa para os grupos de especialistas dentro de um escritório de arquitetura.

*“designtoproduction, primeiramente, é uma empresa de arquitetura, porém nós não fazemos projetos. Nossos clientes são arquitetos que querem construir estruturas com geometrias complexas. Eles chegam à conclusão de que não precisam um grupo especial de projeto interno em seus escritórios”.*

E como a empresa atua em duas etapas do projeto, quando fazem a programação de códigos na fase inicial do projeto, *“os códigos são bastante flexíveis e nós podemos experimentar diferentes formas para fachadas, vigas, sistemas de posicionamento, qualquer aspecto que quisermos testar para otimizar o projeto como um todo”* (IBID.), ou quando recebem um projeto pronto e precisam adequar a fabricação, *“você chega ao momento de incorporar todos os aspectos de engenharia estrutural, aspectos físicos do edifício. Esses aspectos também causam mudanças que devem ser manejadas”* (IBID.). Na maioria das vezes o escritório recebe um arquivo 3D em Rhino, contudo: *“geralmente a qualidade desses arquivos não é boa o suficiente para sobrepor nossa programação sobre esses dados”* (IBID.). Isso é um problema até mesmo para grandes escritórios como continua explicando Walz (*ibid.*):

*“Por exemplo, para o Centro Pompidou em Metz (Arq. Shigeru Ban) [Figura 114], o que nós tínhamos era basicamente uma malha triangular. O que nós precisamos como base é uma superfície contínua. Então se é muito complexo, como neste caso, nós temos outras pessoas com as quais frequentemente trabalhamos, da indústria automotiva, que nos auxiliam a criar essa superfície. Eles possuem ferramentas computacionais específicas para gerar essa superfície de alta qualidade. Então, se você faz um teste de reflexão, a*

*superfície se apresenta totalmente regular, não há distorções. Se você tem uma superfície com discontinuidades, que foi feita a partir de diferentes partes, você sempre terá um problema nessas junções. Se você projetar algo nela, você irá obter linhas descontínuas, então antes de prosseguir com o projeto você deve unir as superfícies”.*

**Figura 114.** Centro Pompidou Metz.



Fonte: Dalbéra, 2010.

Outra questão que Walz coloca com relação a problemas nos desenhos é o que ele chama de “*normalizar*” um desenho. Apesar de estar projetado por computador e as peças se encaixarem perfeitamente, não é possível montar após a fabricação. Ele explica como funciona o método de projeto no escritório de Frank Ghery, o que eleva o preço da construção:

*“Por exemplo, Frank Ghery, do meu ponto de vista tem um trabalho mais escultórico. [...] Normalmente esses projetos são feitos no CATIA<sup>15</sup>, no qual você ainda pode usar alguns aspectos de modelagem paramétrica e associatividade, mas não é uma ideia de projeto fluída, é algo como um monte de recursos agrupados. Claro, é uma maneira muito cara de fazer arquitetura, embora possua certas qualidades. Eu acredito que você jamais poderia descrever esse tipo de projeto em forma de script [ou programa de computador] de maneira eficaz, mas existem outras ferramentas para a realização desses projetos” (IBID.).*

### **Fabricação**

A fabricação digital é um conjunto de técnicas e tecnologias ainda recentes. Walz (*ibid.*) explicou os desafios de trabalhar com empresas que não estão acostumadas produzir elementos arquitetônicos:

*“Normalmente, nós chegamos a projetos que resultam em uma estrutura incomum, com a qual a indústria da construção civil não*

<sup>15</sup> CATIA é um programa de CAD para modelagem 3D desenvolvido originalmente para projeto de aeronaves.

*está preparada. Você não tem uma empresa que tenha feito isto anteriormente, então você procura uma empresa que seja próxima do que você quer produzir ou ao menos tenha as máquinas certas ou tenha experiência com o material. Às vezes nós temos empresas que são perfeitas para fabricar o projeto, mas eles não têm equipe para montagem no canteiro de obras, geralmente eles entregam o produto e é problema de outra pessoa a montagem. Uma boa dica é trabalhar com empresas de fachadas, pois elas geralmente possuem boa experiência em lidar com vidro, aço e metal e eles têm experiência em montagem na obra”.*

Uma questão comum quando se trata de fabricação digital é o valor final da obra.

Walz (*ibid.*) afirma:

*“[...] se é possível executar com fabricação digital não será realmente mais caro. É difícil de dizer, pois quando um projeto é mais complexo, significa que você não pode construir com ângulos retos. Você pode encontrar uma maneira de produzir que é muito mais cara caso você não pense em certas coisas ou você direcione as pessoas para problemas que não são esperados por eles e isso pode realmente prejudicar um projeto”.*

Outros profissionais, assim como Arnold, têm se dedicado a colaborar na execução de obras complexas de outros arquitetos. Esses profissionais que são engenheiros ou arquitetos tem um domínio de técnicas de programação e manipulação de dados, além de conhecimento da indústria e da fabricação, que os faz ser úteis nas etapas do projeto. Como dito anteriormente eles são uma alternativa aos grupos de especialistas. É possível dizer que se estão envolvidos nas etapas iniciais os custos da construção tendem a ser menores.

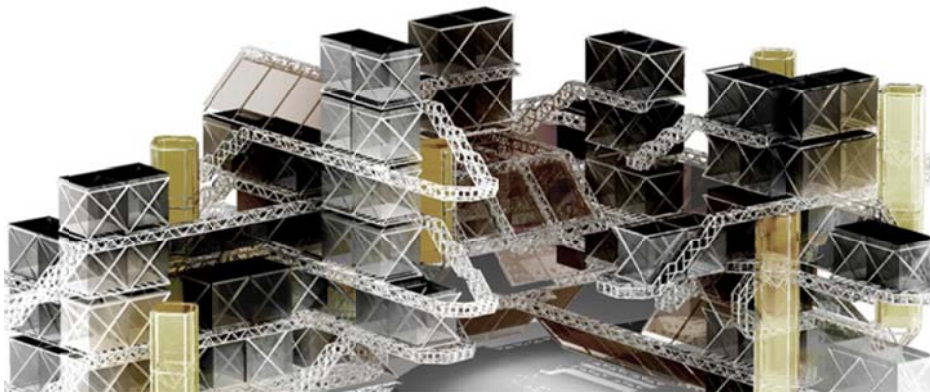


## 7.6 Entrevista Michael Hansmeyer

Michael Hansmeyer é um arquiteto e programador que explora o uso de algoritmos e computação para gerar formas arquitetônicas. Esta seção traz referências de sua página pessoal na internet e também da entrevista realizada por correio eletrônico.

No ano de 2003 Hansmeyer fez seu primeiro trabalho envolvendo complexidade, o qual chamou de L-systems (**Figura 115**). Em sua página na internet, Hansmeyer (2003) afirma: “[f]or centuries architects have been inspired by nature's forms and geometries. Their designs have been influenced by her structures, proportions, colors, patterns, and textures”. Como os L-systems possuem a propriedade de gerar formas de plantas e árvores simplificadas, o objetivo do projeto foi explorar esses algoritmos na arquitetura.

**Figura 115.** L-systems, using three modules as leaves.



Fonte: Hansmeyer, 2003.

Hansmeyer (*ibid.*) explica:

*“The first part explores methods for visualizing L-systems code and considers which characteristics of a design are intrinsic to the logic of L-system. The second part of the project expands the L-system language to incorporate aspects of parametric systems. This allows L-systems to respond to environmental influences and to adapt to a wider range of architectural design requirements”.*

Ao adotar a geração de uma figura recursiva ele busca características que possam ser incorporadas na arquitetura, e usa um sistema paramétrico para permitir configurações diferentes com a mesma regra. Em 2006 ele realiza um estudo de pavilhões com subdivisões de superfícies em três dimensões: *Subdivided Tiles* (*idem*, 2006), como uma maneira de estudar sistemas complexos. Em 2008 esse estudo evolui para Sólidos Platônicos cujas superfícies são subdivididas em partes cada vez menores influenciando atributos como: grau de ramificação, porosidade e fractalização (*idem*, 2008). O trabalho deste arquiteto vem

evoluindo de algoritmos fractais mais simples até a criação de superfícies subdivididas com recursividade mais complexas, como no caso das Colunas Fractais de 2010. O projeto explora a subdivisão de uma coluna dórica (suas proporções essencialmente) em subdivisões que podem ser iteradas com diferentes padrões e combinações.

*“Unlike traditional design processes, the single subdivision process generates the form at all its scales: from the overall proportions and curvatures, to smaller local surface formations, down to the formation of a micro-structure. [...] The ornament is in a continuous flow, yet it consists of a very distinct local formations. The complexity of column contrasts with the simplicity of its generative process” (IDEM, 2010).*

Uma coluna (**Figura 116**, **Figura 117**) foi construída em escala real com 2,7 m de altura usando papel com 1 mm de espessura cortado a laser. Um gabarito de encaixe foi feito em cada corte e também foi removida uma parte interna para diminuir o peso. Um fato interessante é de que uma coluna em geral tem 50 cm de circunferência, a coluna fractal chegou até 800 cm de perímetro. A fabricação da coluna protótipo foi feita na ETH Zurique no laboratório RapLab.

**Figura 116.** Four columns.



Fonte: Hansmeyer, 2010.

**Figura 117.** Coluna exposta na ETH.



Fonte: Hansmeyer, 2010.

Em 2011 o projeto das colunas (**Figura 118**) foi produzido para a Bienal de Design Gwangju usando 2700 folhas de 1 mm de plástico ABS usinado em CNC, o interior da coluna foi feito de ferro e madeira.

Por fim, o projeto *Digital Grottesque*<sup>16</sup> de 2013 parece sintetizar todo esse conhecimento adquirido em um projeto em escala real, o processo de projeto levou 1 ano, a impressão foi feita em 1 mês e a montagem em 1 dia. O arquiteto usou uma técnica de

<sup>16</sup> <http://www.digital-grottesque.com/>

fabricação aditiva, impressão de elementos com areia (silicato e *binder*) no total de 16 m<sup>2</sup> e 3,2 m de altura. Foram usadas 11 toneladas de areia com 0,13 mm cada camada. A impressora possui área de impressão de 4,0 x 2,0 x 1,0 m. Esse projeto foi desenvolvido em parceria com a ETH Zurique e impresso pela empresa Voxeljet AG<sup>17</sup>.

*“Digital Grottesque is between chaos and order, both natural and the artificial, neither foreign nor familiar”* (HANSMEYER, 2013). Neste projeto não há uma preocupação com a função, Hansmeyer (*ibid.*) afirma *“[...] the Digital Grottesque project is less concerned with functionality than with the expressive formal potentials of digital technologies. It examines new spatial experiences and sensations that these technologies enable”*.

**Figura 118.** Colunas na Bienal de Gwangju.



Fonte: Shin, 2011.

### **Tecnologias**

Hansmeyer comenta sobre as tecnologias para o projeto que utiliza e sobre a importância de arquitetos aprenderem programação. Ele não está certo de que é importante ou necessário, por outro lado não é possível gerar uma arquitetura complexa sem recursos computacionais.

*“I mainly use processing and java. I am not sure architects should learn to program. It is just one tool within a much larger set of possible approaches. Yet architects have always been quick to adopt and explore any new tools available to them. And computation is arguably one of the most interesting tools of our times”* (IDEM, 2015).

<sup>17</sup> <http://www.voxeljet.de/>

Novas tecnologias de impressão ainda estão em um estágio de desenvolvimento, especialmente para arquitetura, Hansmeyer (2013), aponta:

*“New materials and fabrication methods have historically led to radical changes in architectural design. [...] Today, additive manufacturing heralds a revolution in fabrication for design. Yet in architecture, this technology has up to now been used only for small scale models”.*

**Figura 119.** Design rendering Digital Grottesque

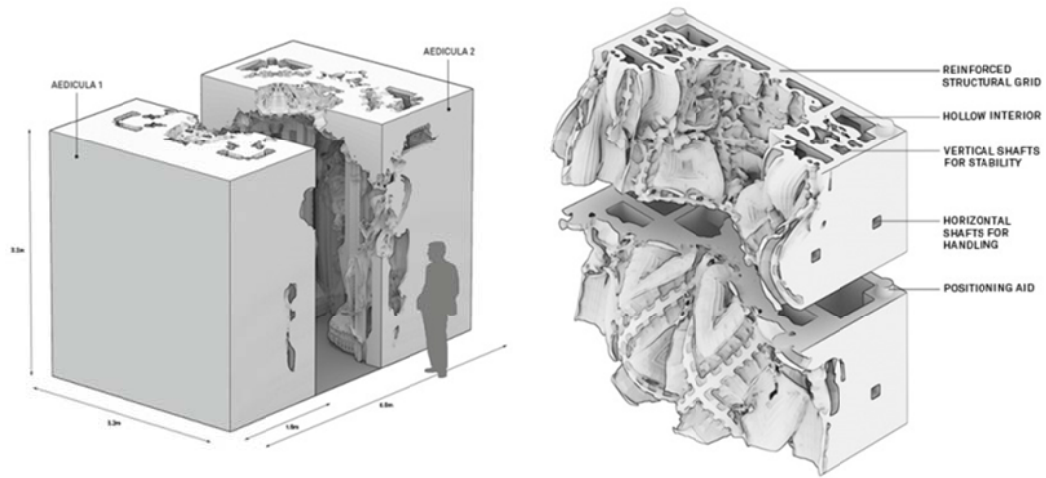


Fonte: Hansmeyer, 2013

Outro aspecto a ser considerado é o valor da produção, Hansmeyer (2013) faz uma observação importante, não há mais diferença entre a impressão de um objeto simples ou complexo. *“There is no longer a cost associated with complexity, as printing a highly detailed grotto costs the same as printing a primitive cube. Nor is there a cost for customization: fabricating highly individual elements costs no more than printing a standardized series”* (IBID.). Ao ser questionado sobre o tempo e custo para a produção de objetos em impressão de areia, Hansmeyer responde: *“[u]sing sand-printing technology, a plain box costs exactly as much to print as the most elaborate form imaginable. The amount of time required is identical as well. All that matters are the bounding box dimension”* (IDEM, 2015).

Sobre a impressão do projeto Digital Grottesque, Hansmeyer (2013), comenta: *“[a]t a basic level, the algorithm used to generate the Digital Grottesque room functions by gradually refining and enriching a simple input form”*. As superfícies são divididas em partes menores em diversas iterações, e num sistema de cascata as alterações se repetem em todas as partes. O resultado possui uma estética complexa, que remete a formas já vistas na arquitetura anteriormente, na arquitetura barroca por exemplo. As questões funcionais não estão em questão neste projeto que testa os limites do projeto computacional e fabricação digital.



**Figura 120.** Diagramas do projeto Digital Grottesque

Fonte: Hansmeyer, 2013.

Hansmeyer (2015) discursa sobre a transição do pensamento modernista na arquitetura:

*“Yet with additive manufacturing, a complex form costs no more to produce than a simple one. A one-of-a-kind object costs almost no more than one that has been produced millions of times. Modernity's rational arguments for simplification and standardization are losing ground. The premises are no longer valid. We must re-evaluate everything – these are exciting times for architecture”.*

### Ornamento

Uma vantagem do uso da customização e de novas tecnologias é a possibilidade de criar ornamentos. *“Ornament and formal expression are no longer a luxury – they are now legitimized”* (IDEM, 2013). Ele complementa:

*“In using this 3D printed technology, ornamentation and free-form geometries are no longer a prohibitive cost factor. The scale of potential three-dimensional differentiation is brought to a micro-level. This technology promises a larger compositional and constructive freedom and a rationalized fabrication of unique, non-standardized architecture”.* (IDEM, 2015).

O ornamento contemporâneo também foi discutido com Hansmeyer. Porque você acha que há uma busca pelo ornamento complexo na arquitetura contemporânea?

*“Because we can. People are naturally curious to discover and explore new possibilities. But also because mass fabrication has been very homogenizing, and many people appreciate heterogeneity, diversity, etc”* (IBID.).

Ele comenta sobre o preconceito contra o ornamento:

*“The modernist aesthetic that some of us hold dear is a direct result of mass fabrication. Smooth, flat surfaces were easier to produce than curved and detailed ones. Beyond this, the logic of the assembly line is counter to one-of-a-kind objects suited to individual tastes. Thus there was always pressure to find a lowest common denominator. With mass fabrication, one-of-a-kind and articulated objects were a luxury and became associated with conspicuous consumption – prompting Adolf Loos’s to declare ornament as a crime” (IBID.).*

### **Tecnologia de impressão com areia**

Uma das questões envolvendo o uso de impressão 3D em larga escala para arquitetura é que ainda existem algumas limitações.

*“The application of 3D printing technology in architecture has up to now been limited to prototyping or producing small-scale models. Material costs are high, machines have limited scales, and the majority of materials are not strong enough to fulfill construction requirements” (IDEM, 2013).*

**Figura 121.** Instalação do projeto Digital Grotesque



Fonte: Hansmeyer, 2013.

Por outro lado a tecnologia de impressão com areia parece ser uma alternativa viável para arquitetura, Hansmeyer explica as vantagens como, por exemplo, a fabricação de elementos com até 8 m<sup>3</sup> que são autoportantes.

*“Sand-printing technology was previously used mostly for disposable casting parts. We’re now using it to create durable architectural elements. We thus had to do research on the material’s structural strength, and on its surface properties. Pieces weighing 11 tons in total had to be assembled and adjoined at the precision of millimeters (IDEM, 2015)”.*

## 7.7 Entrevista Daniel Corsi

O arquiteto Daniel Corsi, do escritório Corsi Hirano (anteriormente CNH), de São Paulo, conversa sobre o projeto do edifício para o Museu de Ciências da Unicamp. Corsi relata sua experiência prévia em Barcelona, trabalhando no projeto do edifício MediaTIC, do arquiteto Enric Ruiz-Geli, e pesquisando com Willy Müller, um dos diretores do Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha (IAAC), que “*tem uma filosofia muito parecida com a A.A. de Londres, que é efetivamente a experimentação*” (CORSI, 2014). Segundo ele, a experiência na Europa “*abriu um universo de possibilidades*” (IBID.).

O projeto de Corsi para o Museu da Unicamp teve como motivação a própria Ciência, levando em consideração o fato de que o júri era multidisciplinar, incluindo um físico, um matemático, um historiador, enfim, não apenas arquitetos. Assim, ele resolveu incorporar elementos da ciência no projeto (Figura 122):

*“[...] o espaço passa a ser importante, não só os elementos expositivos, e como você consegue elementos que vão mostrar uma informação. Então, além desses elementos, a arquitetura é crucial para isso. Como a arquitetura também participa de um conhecimento ela passa a ser parte do acervo” (IBID.).*

**Figura 122.** 1ª Fase Museu de Ciências da Unicamp



Fonte: Corsi Hirano, 2009.

No entanto, Corsi (*ibid.*) relatou seu receio em incorporar todas as novas tecnologias com as quais havia tido contato em Barcelona:

*“[...] havia uma preocupação de onde certas coisas são possíveis e cabíveis no nosso contexto e como a gente poderia assimilar essas coisas no Brasil. Não dá para pensar que podemos, hoje, projetar ou pensar as coisas de uma maneira equivalente. É uma questão de tecnologia. [...] O projeto [...] tem que apresentar para o júri uma base com uma consistência que assegura que essa experimentação é possível. Como o intuito é construir, não adianta você mostrar uma ideia absolutamente distante da realidade. [...] O fractal vai entrar aqui realmente como um elemento de expressão e de uma intenção*

*... muito grande nossa de que, de certa maneira, estimulasse a percepção das pessoas”.*

Se por um lado o uso dos fractais é apresentado como uma motivação justificada por se tratar de um programa de Museu de Ciências, por outro parece existir um receio, por parte do arquiteto, em como essa temática e sua viabilidade, em termos de custo e execução, serão aceitas pelo júri do concurso.

### **Uso de SGs**

O fractal é um exemplo típico de SG de projeto, pois constitui-se em um processo indireto de obtenção de composições visuais, baseado na aplicação recursiva de regras (CELANI, VAZ, PUPO, 2013; FISCHER, HERR, 2001; OXMAN, 2008). Em consequência de seu grande potencial para a geração e avaliação de múltiplas alternativas de projeto, lançando mão do potencial disponibilizado pelo uso da computação, o ensino de SGs em escolas de Arquitetura e Urbanismo vem se tornando cada vez mais presente nos países desenvolvidos. Contudo, segundo Fischer e Herr (2001), o ensino de SGs demanda a introdução de uma gama de conteúdos teóricos e tecnológicos, que incluem matemática avançada e programação de computadores. No Brasil, o estudo desses sistemas ainda é muito limitado, em geral restrito à pesquisa acadêmica, não fazendo parte da formação na área de Projeto.

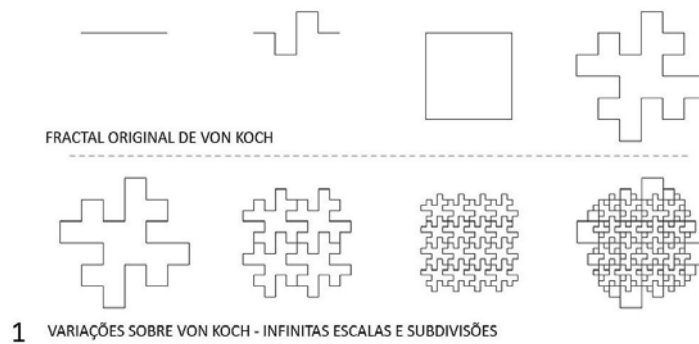
Na descrição que Daniel Corsi faz sobre o uso de Fractais no projeto para o Museu de Ciências da Unicamp fica claro como o conhecimento superficial desses conteúdos por parte dos arquitetos do escritório dificultou o trabalho, fazendo com que eles acabassem por adotar o que chamam de “licença poética” (grifo nosso).

*“O que temos aqui talvez não seja uma expressão absolutamente precisa da teoria do fractal, pois nem dominamos isso pra saber, estudamos o assunto como arquitetos de uma maneira periférica. [...] abrimos uma licença poética, digamos assim, que se traduz em arquitetura. [...]” (CORSI, 2014).*

Existia, por parte dos arquitetos, uma intenção de criar seus próprios fractais, ao invés de simplesmente copiar fractais clássicos, como a curva de Koch (**Figura 123**), quando na verdade se trata da curva de Minskowski:

*“[...] isso seria a aplicação literal do von Koch, como a gente estabelece a nossa própria leitura sobre ele? Uma leitura arquitetônica. Aí fomos para um segundo passo que era a partir do diagrama dele começar a tecer uma nova geometria que respeitava os mesmos critérios de escala, modulação, reprodução” (IBID.).*



**Figura 123.** Processo Generativo do Museu de Ciências

Fonte: Corsi Hirano, 2009

Corsi (*ibid.*) descreve seu interesse em criar uma aparente “desordem”, baseada em uma lógica subjacente:

*“Por mais caótica que ela seja, aleatória, desordenada, que era o que a gente queria, mas por trás ela tem uma lógica. Não há uma aleatoriedade completa, talvez exista, mas surgiu a partir de um método compreendido de como ela acontece”.*

No entanto, quando questionado sobre como havia sido feita a automação do processo de geração dos fractais na segunda fase do projeto (**Figura 124**), Corsi responde:

*“Aí vem uma curiosidade que você pode achar interessante. A gente já tinha mexido com alguns programas, até de programação, mas sinceramente na situação que estávamos e no nível que de complexidade que a gente tinha, não tínhamos o domínio disso. Não tínhamos o conhecimento das ferramentas digitais para produzir isso, através de uma programação. Então foi manualmente, e foi difícil. Passamos por um processo que foi muito empírico” (IBID.).*

**Figura 124.** 2ª Fase Museu de Ciências da Unicamp

Fonte: Corsi Hirano, 2009.

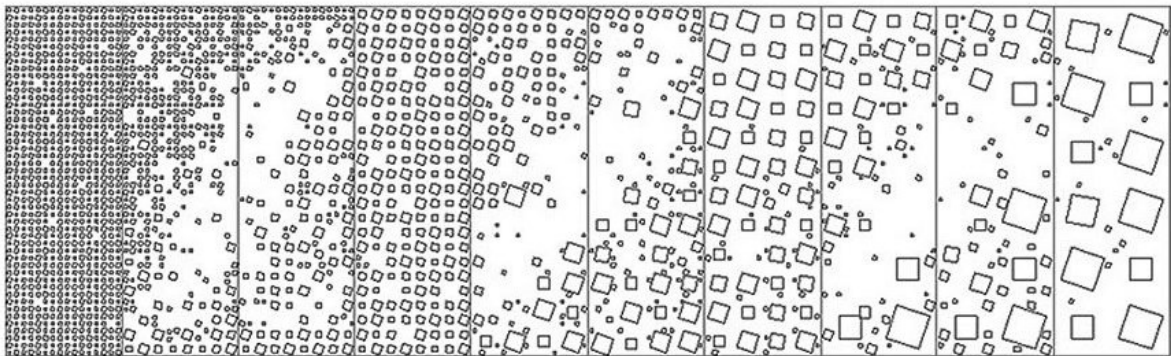
Em seguida, descreve o processo manual de criação do fractal:

*“Cada elemento iria se tornando menor. [...] a gente ia reduzindo em escala o mesmo desenho para que ele fosse variando em tamanho sempre respeitando isso. Um se encaixaria perfeitamente no outro por uma razão geométrica. Isso dava origem ao buraquinho pequeno, ao médio, ao outro médio e o maior. E a gente ia distribuindo isso na chapa” (IBID.).*

Mas durante o processo de desenho da textura que seria aplicada à fachada (Figura 125) surge a preocupação (injustificada, como se verá adiante) com a execução, que interfere na composição:

*“Mas começava a apresentar outro problema, uma chapa de aproximadamente 3 por 1,20 m com recortes com esse nível de complexidade. Uma máquina a cortar um negócio desses num museu que tem 5.000 m<sup>2</sup> de superfície seria inviável, é muito complexo. Se não podemos ter isso, como simplificamos isso sem perder a essência?” (IBID.).*

**Figura 125.** Dez Painéis.



Fonte: Corsi Hirano, 2009.

O fato de o processo de composição ser extremamente trabalhoso e não ser automatizado acaba por interferir no resultado final. A ideia inicial, segundo Corsi, era ter uma gradação suave na densidade das perfurações, passando de áreas com maior luminosidade para áreas com menor penetração da luz. Como não possuíam conhecimentos para obter de forma automatizada, os arquitetos acabam optando por desenhar apenas 10 chapas diferentes, que acabam dando origem a 10 mais, a partir de uma transformação geométrica simples (rotação):

*“Aí veio o momento talvez mais difícil, que foi nesse aspecto que te falei, manualmente. Temos quatro placas, vamos tentar trabalhar com uma placa de transição, mas não foi suficiente, então a gente aumentou para duas placas que iriam fazer transição entre as placas homogêneas, e que iriam sempre transitar em uma diagonal. A gente ia testando tudo ao mesmo tempo: fazia um desenho, aplicava no modelo como textura, renderizava pra ver o que gerava em várias escalas, de longe de perto de dentro, pra ir testando os efeitos. Então a gente foi concluindo que era necessária essa transição lateral e*

*diagonal, isso na verdade que são dez placas, com a diagonal poderia girar e transformar em 20 situações, por isso a diagonal era importante. A gente concluiu isso, além das quatro coordenadas (homogêneas), as seis de transição e foi também num processo quase visual. A gente colocava nos arquivos todos os buraquinhos e ia tirando e colocando. Aqui já não há um critério de composição controlado, é realmente visual, não teve programação” (IBID.).*

A análise da fala de Corsi leva a uma reflexão sobre as possibilidades perdidas em consequência da falta de conhecimento e habilidades técnicas por parte não apenas desses arquitetos, mas dos arquitetos em geral. Afinal, esta análise não tem o objetivo de criticar o trabalho do arquiteto entrevistado, mas identificar, por meio deste caso específico, as deficiências da formação do arquiteto para atuar no cenário de uma Arquitetura Contemporânea, que a cada dia incorpora mais aspectos científicos e tecnológicos.

### **Uso da Fabricação Digital**

Um pressuposto é o de que há um desconhecimento da existência de um parque industrial equipado com máquinas de Controle Numérico no Brasil por parte dos arquitetos. Esse pressuposto já foi afirmado por Neander Furtado Silva (et. al, 2009:430,431, grifos nossos):

*“Acreditamos que a dificuldade de incorporação da fabricação digital na produção da arquitetura brasileira não é mais resultante de uma possível ausência de tais recursos neste país. É importante ressaltar que estes se encontram disponíveis e em largo uso pelas indústrias aeronáutica e automobilística nacionais. É ainda mais importante salientar que sistemas de fabricação digital já se encontram disponíveis, por exemplo, em várias fábricas de estruturas e esquadrias metálicas deste país. Acreditamos que a razão principal para a não incorporação da fabricação digital na projeção e construção de edificações no Brasil deve-se, neste momento, essencialmente à desinformação muito mais do que a uma alegada indisponibilidade tecnológica, à falta de formação e treinamento formal no contexto do ensino de projeto de arquitetura e à falta de ligações mais próximas entre escolas de arquitetura e a indústria da construção civil”.*

A mesma afirmação foi feita por Kolarevic (2013, p. 40), em conversa com os pesquisadores do LAPAC:

*“Architects might be ignorant of digital fabrication, and I don't really blame them. But I think you would be surprised with how much of this technology is actually accessible almost universally. I've discovered that in various parts of the US and Europe the folks who are involved in metal sheet fabrication – aluminum, steel, any kind of metal – they do have CNC capabilities. I bet that if you were to go around*

*Campinas you would find a lot of metal shops and all of them can have some CNC capacity”.*

Embora esse pressuposto seja real para a maioria dos arquitetos, ele não se aplica no caso de Corsi. Quando questionado se havia encontrado alguma indústria que poderia executar os painéis da fachada do Museu, Corsi (2014) responde:

*“Encontramos parceiros que produziram isso muito tranquilamente. [...] E sempre que apresentamos para uma empresa, ficam encantados e todos querem fazer. Tem um caráter inusitado muito grande, mostra do que a indústria é capaz”.*

Isso corrobora para a hipótese de que sua hesitação com relação ao emprego da Fabricação Digital no projeto se deva ao fato dele acreditar que a ideia será identificada como algo caro ou inexecutável por parte dos clientes. Ao mesmo tempo, é possível perceber que o próprio Corsi possui dúvidas quanto à viabilidade econômica de produzir centenas de elementos diferentes, mesmo utilizando equipamentos de Fabricação Digital:

*“[...] não poderíamos apresentar como projeto para o júri, um projeto onde cada placa desse museu enorme, fosse uma diferente da outra. Isso seria extremamente arriscado como viabilidade desse museu. Seria inviável, você não consegue... Não tem verba para construir ou bancar uma tecnologia desse tipo. [...] Talvez na China ou na Alemanha você pudesse dizer: é uma peça diferente da outra, cada perfuração tem um milhão de ângulos. Pra eles talvez isso seja diferente, porque a economia deles permite, pra gente não, precisamos de outro fator, pensar que isso deve ser viável economicamente.” (IBID.).*

O trecho acima mostra que o arquiteto, apesar de ter um conhecimento das novas tecnologias adquirido no exterior, se sentiu inseguro quanto à possibilidade de efetivamente empregá-la. Na China, na Alemanha ou no Brasil, as máquinas de corte de chapas metálicas por Controle Numérico são idênticas. Por que motivo “a economia deles” permitiria fabricar “uma peça diferente da outra”, e a nossa não?

Além do medo de não obter a compreensão por parte do cliente e assim ser prejudicado no concurso, o próprio arquiteto sente-se inseguro com relação à adoção de uma nova lógica de produção. Esse fato talvez possa estar associado à lógica industrial/modernista nele incutida durante sua formação no Brasil, segundo a qual a repetição e a escala de produção seriam a única maneira de assegurar o baixo custo. Ora, quando se utiliza um equipamento de Controle Numérico a repetição não tem qualquer impacto no custo, portanto a preocupação do arquiteto realmente não se justifica, mas demonstra a necessidade de educação das novas gerações de arquitetos quanto a este aspecto dos novos meios de produção.

## 7.8 Entrevista Guto Requena

Guto Requena é um dos arquitetos brasileiros que tem empregado tecnologias no projeto de modo inovativo, procurando uma adaptação para o contexto brasileiro. Alguns projetos e vídeos disponíveis na página do arquiteto foram estudados previamente para conhecer a sua produção.

### Trajetória e Primeiros Projetos

Guto Requena (2014) começa explicando um pouco da sua trajetória profissional e seu primeiro trabalho de destaque no SESC Pompéia.

*“Eu entrei na faculdade de arquitetura da USP em 1999 [...]. Foi o ano que eu tive o primeiro contato com email e redes sociais, então teve um impacto das tecnologias digitais na minha vida que foi gigante naquele ano. E no fim do ano eu entrei em contato com o trabalho do Nomads<sup>18</sup>, que foi o grupo de pesquisa que eu fiz parte durante quase dez anos, terminei a graduação e engatei direto no mestrado. [...] Eu acho que o primeiro trabalho onde eu trago a questão do uso de sensores, tecnologias interativas e interação digital, foi a cenografia de uma exposição chamada Ateliê de Cibercostura. Foi uma cenografia para o SESC Pompéia” (Figura 126).*

**Figura 126.** Ateliê de Cibercostura.



Fonte: Parente, 2010.

O grupo Nomads tem uma tradição em pesquisas sobre design, processos contemporâneos de projeto, novas mídias, leituras digitais da arquitetura, geralmente com uma abordagem sociológica presente. Esse grande período de pesquisa parece ter influenciado o arquiteto a adotar meios digitais no projeto e buscar formas de aproximação da tecnologia com as pessoas. O direcionamento *low budget* dado neste primeiro trabalho do arquiteto no

<sup>18</sup> Nomads.USP é o Núcleo de Estudos de Habitares Interativos da Universidade de São Paulo.  
<http://www.nomads.usp.br/site/>

SESC é comum em experimentações com novas tecnologias, vide os trabalhos, chamados de *high-low*, desenvolvidos no evento *A.A. Visiting School Brasil 2011*: alta tecnologia com apropriação de materiais de “baixa” qualidade, descartados ou recicláveis. Pode-se observar essa característica no trecho a seguir:

*“[...] eu criei uma grande superfície, que eu chamei de membrana interativa, e ela dialogava com o prédio a partir das suas proporções, todas as relações de altura, tamanho, distância dessa grande membrana se relacionava com a área que ela estava. Instalamos uma série de oito grupos de sensores dentro do prédio, que reconheciam movimento e barulho das pessoas. Essa membrana respondia de uma maneira muito simples que era trocar de cor, então cores mais quente indicando mais barulho e movimento, cores mais frias indicando menos barulho e movimento. A gente fez tudo muito low budget, tudo programado dentro do Hacklab<sup>19</sup> do próprio SESC. E usamos plástico bolha para fazer toda a vedação” (IBID.).*

Ainda explicando seus projetos e relação do digital com fabricação, Requena (*ibid.*) comenta como criou a coleção *Era uma vez*.

*“[...] em 2011 eu resolvi fazer o meu primeiro produto que foi a coleção *Era uma vez*<sup>20</sup>. O primeiro produto que eu experimentei, mais explicitamente, a questão cultura digital. Eu convidei a minha avó para me recontar algumas fábulas de infância. [...] gravei várias das histórias e selecionei as minhas quatro histórias favoritas. Então a gente criou uma programação dentro do Processing<sup>21</sup> de maneira que ele analisa um pouco o drama narrativo na voz da minha avó. Conseguir reconhecer certos padrões de humor e gera um desenho em função disso e depois é assoprado” (Figura 127).*

**Figura 127.** Coleção *Era uma vez*.



Fonte: Cimardi, 2011.

<sup>19</sup> Hacklab é um laboratório para aprendizagem de programação dentro do SESC Pompéia.

<sup>20</sup> Coleção *Era uma vez* fabricada por Vidros Zero 1.

<sup>21</sup> Processing é uma linguagem de programação e ambiente de desenvolvimento. <https://www.processing.org/>

A mídia digital aqui, narração da avó, funciona como um elemento randômico no design. Ele não possui controle deste elemento, pois depende das oscilações na voz que podem variar se a história for recontada, mas que gera uma forma linear: uma curva. Essa curva então é rotacionada num eixo formando um vaso, o restante do processo é artesanal com tecnologia de vidro com sopro. Apesar da intenção de trazer emoções para o objeto, é difícil relacionar a história ou mesmo a sensação de ouvir ou contar história com o objeto. É o que o arquiteto Reiser (2006) chama de erros comuns a serem evitados no projeto digital, o abuso dos dados, *“the graph bears only a conventional relationship to the content that it is graphing and could take any number of forms, none of which would have any necessary formal relationship with the architecture”*. Os autores citam o exemplo de um edifício para uma estação climática cuja cobertura é gerada por meio de gráficos da variação pluviométrica anual do local, fazendo pouco sentido para o projeto em si.

### **Processo de Projeto**

Primeiramente Requena explica que seu processo de projeto não é linear, contudo é possível observar na sua fala uma preocupação em explicar como são conduzidos os processos e como os objetos produzidos são resultados de um método de releitura de dados.

*“[...] dentro do possível eu tento eu fazer um planejamento, olhar um cronograma, tento esticar uma metodologia, entender os processos. Mas na prática a coisa é muito orgânica, o mercado de trabalho é muito diferente da academia. [...] não é tão linear” (IBID.).*

Por outro lado, mesmo em uma realidade de mercado de trabalho complexa, na qual muitas etapas do projeto ocorrem simultaneamente, a necessidade da organização do processo é um fato inegável. Em outro projeto ele ressalta a memória novamente como elemento essencial do projeto. Mas a memória auditiva pode ser transferida para uma forma, da mesma maneira que a memória visual é transferida para o tato?

*“No caso da Noize<sup>22</sup>, da cadeira, tinha a ver com a memória coletiva dos móveis da Lina. Eu acho que a cadeira Girafa é a peça mais importante do mobiliário brasileiro, está no imaginário coletivo de muita gente que conhece design. E a rua, essa memória da paisagem sonora, que é uma coisa que me interessa a música, o áudio, o som” (Figura 128) (IBID.).*

---

<sup>22</sup> Cadeira Noize: intervenção no modelo digital da cadeira Girafa da arquiteta Lina Bo Bardi, fabricada pela empresa i.materialise: <http://i.materialise.com/>

**Figura 128.** Cadeira Noize.

Fonte: Sadurski, 2013.

A questão da autoria no projeto é colocada em questionamento.

*“De quem que é a Noize, é minha mesmo? É dos caras que programaram? É da Lina? Ela é um remix. Na verdade estamos fazendo outra versão que vai chegar amanhã que é o remix do remix, é uma Noize remixada. Usamos outra técnica, a gente ‘remixou’ a Noize, para produzi-la de uma maneira mais barata. Aparece a questão: quem é o autor? Sou eu? É o pessoal que fez o software? É a equipe que faz a programação comigo? O marceneiro que mudou uma coisa e também tem parte no processo?” (IBID.).*

Essa problemática da autoria é um tópico muito discutido na área do projeto computacional, apesar de não ser o foco desta tese, está relacionada com o controle do arquiteto no processo. Hansmeyer (2010) afirma: “[t]he architect assumes the role of the orchestrator of these processes”, essa metáfora que pode ajudar a esclarecer essa questão é a do arquiteto visto como um maestro que coordena (processo de projeto) uma orquestra de modo a obter o melhor som (arquitetura) possível dependendo totalmente dos seus músicos e instrumentos (tecnologias).

Mais adiante na entrevista, quando questionado sobre as formas complexas no projeto, ele concorda que há um processo em seu trabalho e que os resultados dos objetos são diretamente ligados ao processo.

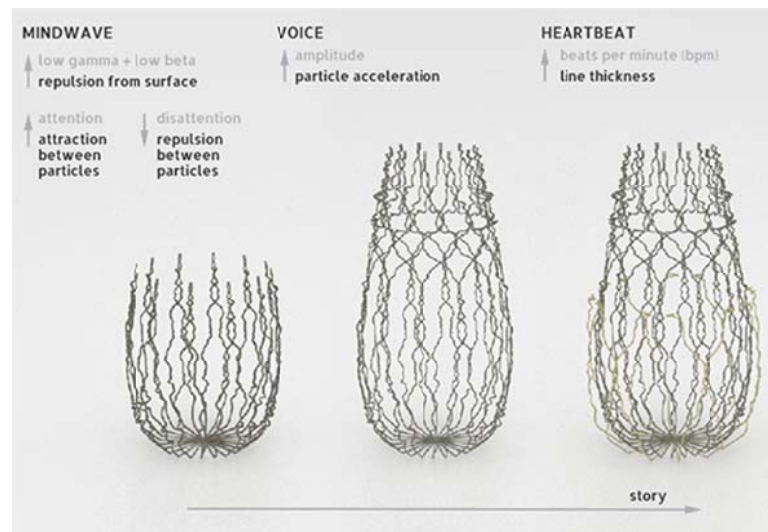
*“A questão é o processo e o resultado final é sempre uma surpresa e isso eu sempre acho mais legal. Na Noize a gente fez dentro do processo de parametrização, você tem controle dos parâmetros, então agora a cadeira não fica de pé, agora sim, agora ficou esquisita... Mas é o resultado do processo. [...] Dentre de todos os projetos, o*



*último Love Project<sup>23</sup>, a gente não tem controle absolutamente nenhum. Eu tenho um mini controle, a gente cria um campo gravitacional, para as partículas crescerem em volta desse campo gravitacional garantindo uma função. No caso de um vaso ela deve crescer em torno de um eixo se forme, no caso de uma luminária ou de uma fruteira” (REQUENA, 2014).*

O controle do arquiteto é fundamental para gerar objetos funcionais e belos, mesmo em processo cujos dados de entrada sejam aleatórios ou complexos (Figura 129). A forma complexa, neste caso, é o resultado de um processo que inicia com pouco controle do arquiteto, um processo de experimentação. Os dados são gerados de maneira aleatória e são “moldados” em um projeto ou forma.

**Figura 129.** Parâmetros Love Project.



Fonte: Requena, 2014.

## Fractais

Ao comentar sobre a complexidade, Guto demonstra ter um conhecimento superficial sobre a teoria dos fractais, de fato em seguida ele afirma nunca ter usado essa geometria em projetos.

*“[...] essa geração Zaha Hadid, todos esses grandes arquitetos que usam formas complexas para criar edifícios de arquitetura, está muito impregnada. [...] A grande questão é, a gente entra nesse momento da era digital em que tudo vira fractal, tende a ter essa estética da lapidação e do triângulo. Quando você "escaneia" uma coisa e diminui a resolução ela vai ficando cada vez mais triangulada. Quando você perde a resolução, tudo tende a ficar triangulado, aí se gera essa estética da lapidação, dos fractais e dos triângulos que a*

<sup>23</sup> Love Project, fabricado por Anacom: <http://anacom.com.br/>, Impresso em 3D pela Akad: <http://www.akad.com.br/>

*gente assiste de um monte de maneiras, e vira tanto um movimento estético quanto um movimento de processo mesmo” (IBID.).*

O triângulo de Sierpinski se popularizou como um exemplo para explicar a GF, e essa imagem associada à palavra fractal, que lembra fragmento, tem criado uma ideia equívoca do que é fractal para alguns arquitetos. O movimento estético ao qual Guto se refere, talvez seja a subdivisão de superfícies em partes menores, triângulos, hexágonos ou retângulos para possibilitar a produção de curvas complexas, o qual pode se chamar de triangulação. A triangulação é uma das opções de construção de superfícies complexas, pois os três pontos do triângulo sempre formam um plano, o que evita superfícies de dupla-curvatura e facilita a fabricação. Apesar de não deixar claro em suas respostas, parece que um algoritmo **Diagrama de Voronoi** (subdivisões a partir de pontos) foi aplicado no projeto Nossa Senhora Des-Aparecida (**Figura 130**), o qual ele explica:

*“eu selecionei uma santa brasileira, Nossa Senhora Aparecida, esculpida a mão em madeira. A gente "escaneou" a peça, a metade dela cortamos e fazemos a outra metade por impressão 3D, mostrando essa perda de resolução, depois juntamos as duas metades e surge Nossa Senhora Des-Aparecida”<sup>24</sup> (IBID.).*

**Figura 130.** Nossa Senhora Des-Aparecida.



Fonte: Reis, 2014.

Guto comenta seu interesse em “*questões artesanais, do handcrafted, do feito a mão*” (IBID.) ao mesmo tempo embutindo projeto computacional no processo:

---

<sup>24</sup> Nossa Senhora Des-Aparecida: Artesão: Vanderlino Miguel de Souza para Sutako, trabalho na madeira: Pedro Terra LAB <http://www.pedroterralab.com/> e impressão 3D: Garagem FAB LAB <http://www.garagemfablab.com/>

“[...] a gente fez um tapete para uma empresa chinesa chamada Tai Ping<sup>25</sup>, [...] Comecei a pesquisar e descobri que teve um artista alemão que pintou a considerada primeira colônia de imigrantes chineses no Brasil 200 anos atrás para plantar chá verde no Rio de Janeiro no Jardim Botânico. Eu achei essa imagem muito interessante pelo que simbolizava, a gente pegou a imagem na internet e começou a "pixelar" a imagem, até chegar em 5 tons de pixels. A maneira que a gente parametrizou foi pegar todos os pixels brancos e ligar os pontos. Virou uma grande malha de triângulos. [...] Ai eu queria trabalhar com a questão da música e existe um músico chinês que eu adoro, e eu peguei uma música dele que fala de separação e reconciliação, que é uma orquestra sem vocal. A gente separou 5 tons/cores da pintura, e conforme a música toca ela vai "parametrizando" as cores, vai soltando as cores onde ela quer. É um processo semi controlado [...]”(IBID.).

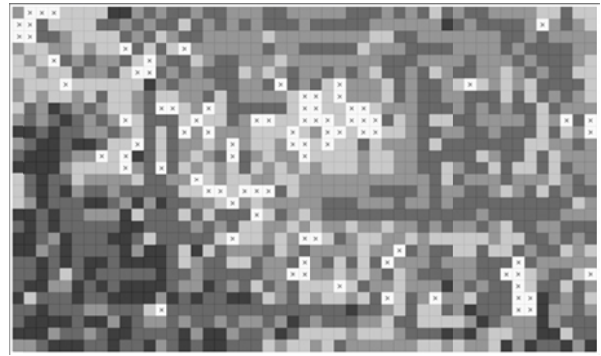
Nesta resposta, Guto segue comentando sobre a “triangulação de superfícies” e explicando o processo do tapete Tea Hug (Figura 131, Figura 132, Figura 133, Figura 134), que é na verdade um algoritmo de **Triangulação de Delauney**. Percebe-se nos diagramas de etapas do processo que os vértices do tapete foram adicionados aos pontos mapeados na imagem. Novamente vê-se a questão do processo com dados de entrada aleatórios produzindo um resultado que só é perceptível com a explicação do arquiteto.

**Figura 131.** Chineses cultivando chá no Jardim Botânico.



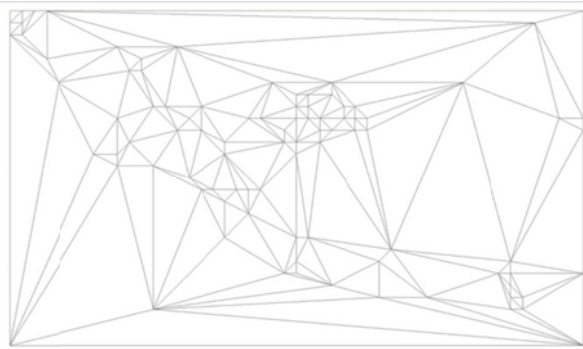
Fonte: Rugendas, 1835.

**Figura 132.** Processo generativo: criação de pixels e seleção de pontos (brancos).



Fonte: Requena, 2014.

<sup>25</sup> Tai Ping: <http://taipingcarpets.com/>

**Figura 133.** Triangulação de Delauney.

Fonte: Requena, 2014.

**Figura 134.** Tapete Tea Hug.

Fonte: Requena, 2014.

Questionado sobre a utilização de GF ele respondeu: “[...] *a gente nunca usou literalmente a questão dos fractais em projetos ainda*” (IBID.). Apesar de não ter utilizado a GF ou recursividade em seus projetos, e nem conhecer como programar, Guto parece estar aberto a experimentar com as novas tecnologias. É importante ao arquiteto conhecer alguns conceitos básicos de programação, mesmo que outros farão o código. Esses conhecimentos são recursos importantes para resultados coerentes com o objetivo do projeto e dos dados manipulados.

### **Fabricação Digital**

Comentou-se sobre as possibilidades da fabricação digital no projeto e como ele insere essas tecnologias. Neste trecho mais longo da entrevista diversos processos de fabricação são relatados, bem como erros e acertos ao lidar com novos processos de um modo geral.

*“Tenho interesse muito grande de investigar e experimentar essa tecnologia disponível. A gente vê uma série de Fab Labs, mesmo dentro das empresas a gente vê eles comprando essas máquinas sem conteúdo. [...] No caso do banco Samba<sup>26</sup>, [...] eu escolhi três músicas que eu amo, que acho que são importantes para a história do samba. E foi uma programação muito simples, a partir dessas músicas a gente coleta: graves, agudos, médios, vocais e timbres para usar como input paramétrico. Então conforme você vai tocando a peça vai sendo construída. Esse arquivo é mandando para uma fábrica que fica em Carrara, a gente esculpe uma peça de mármore. Também conceitualmente tinha uma ideia bacana, eu queria que fosse uma peça de mármore de 1 x 1 x 1, um cubo perfeito. Desse cubo a gente vai esculpir, não pela mão do homem, mas pela "mão" da máquina, para criar essa peça. É quase como se a gente conseguisse tirar essa música de samba e implantar diretamente em uma máquina para ver a reação dela. Claro que tudo isso controlado. Teve uma coisa*

<sup>26</sup> Banco Samba fabricado por Margraf: <http://www.industriamarmivicentini.com/>

engraçada, quando eles perguntaram se eu não queria deixar a peça oca por dentro? De jeito nenhum, é que nem fazer uma peça de ouro e tirar dentro para ficar mais leve, não pode, o mármore é uma coisa que está dentro da terra, material nobre, uma pedra superbonita. E ainda tive a honra de fazer com mármore de carrara em Carrara na Itália. Bom o banco pesa 400 kg não sai do lugar, não tem como mexer ele, é inviável. Então agora a gente está revendo o projeto, a gente diminuiu um pouco o tamanho da peça e vai ter que ser oco por dentro, que eu acho que é uma pena. Na verdade o que a gente está tentando fazer é não só tirar o que está dentro, mas reaproveitar o que está dentro pra criar outras peças. Estamos um pouco nesse desafio. Recentemente a gente fez uma versão mais barata do Samba que foi feita em corte de CNC com uma chapa de madeira. A gente pegou exatamente os mesmos inputs paramétricos de uma das músicas, mas programou isso num corte numa placa, que é o que eu estou fazendo com a Noize agora. Exatamente a cadeira Noize, jogou dentro do programa que fatia toda ela e joga para o CNC. O desafio foi como fazer para ter menos sobra, aproveitar melhor a placa, estou aprendendo mais agora sobre corte em CNC. Então corte de CNC temos utilizado e impressão 3D de várias maneiras diferentes. A gente já usou ABS, a Noize é feita em ABS na i.materialize. Outra coisa que eu acho super-rica no processo é imaginar que num click a minha cadeira chega à Bélgica e 3 dias ela está de volta no Brasil, é uma lógica completamente diferente. A gente trabalhou com a Metamáquina<sup>27</sup>, a gente fez ano passado na São Paulo Design Week imprimindo num polímero feito de cana de açúcar que tem uma resolução baixa, mas a gente assumiu essa coisa da linha da resolução. Esse ano a gente voltou a trabalhar com ABS, e agora a gente trabalhou com poliamida. Fizemos na Stratasys<sup>28</sup>, não... foi na Solid Concepts<sup>29</sup> que tem nos Estados Unidos e na China, eles não tem no Brasil ainda, mas é um material muito legal. Uma poliamida parece uma cerâmica, ela é mais parruda, bem legal, mas supercara. Esse é o grande problema dos meus projetos hoje, comercialmente eles são muito difíceis de serem vendidos. Estou num impasse como eu faço dinheiro, pois é um investimento pessoal muito grande. O Love Project teve um investimento de dois anos do meu bolso, para fazer o Love Project acontecer e agora que aconteceu, não tenho nenhum retorno financeiro imediato. Gerou muita publicação, muita entrevista em inglês. De alguma maneira vai chegar outros projetos, mas essa é uma dificuldade que eu estou passando agora. Como eu faço os projetos se manterem sendo que comercialmente eles não são viáveis” (Figura 135) (IBID.).

<sup>27</sup> Metamáquina: <http://metamaquina.com.br/>

<sup>28</sup> Stratasys: <http://www.stratasys.com/br>

<sup>29</sup> Solid Concepts: <https://www.solidconcepts.com/>

**Figura 135.** Banco Samba.

Fonte: Stoodeh, 2014.

O mesmo processo utilizado nos vasos foi repetido para os bancos criando mais uma peça escultórica do que funcional, o problema do peso da peça que não foi considerado, tampouco o desperdício de material usinado. Guto está revendo seus processos procurando criar ou recriar peças mais funcionais para atingir um número mais significativo de clientes, pensando também no melhor aproveitamento de material. O trecho a seguir é muito interessante, pois ele cita diversas empresas, mas ainda há um custo muito alto para a produção de peças específicas. Ele também cita a experiência de produzir peças no Brasil.

*“[...] no Love Project a gente conseguiu uma parceria com a Anacom, eles se interessaram em imprimir. Mas o produto deles ficou muito frágil. Uma peça que se eu fosse pagar pra fazer custariam uns 4 ou 5 mil reais, mas não dá para vender, pois ela ficou muito frágil. [...] No caso da Noize que a gente produziu na i.materialize e teve uma coisa supertriste. A gente produziu lá, a produção original eram três cadeiras, era a distorção de três clássicos do design: Lina Bo Bardi, Sérgio Rodrigues e Carlos Motta. A primeira cadeira que veio foi a da Lina, as outras duas ficaram paradas no porto, pois a gente fez um processo de importação errado. [...] A gente perdeu essas cadeiras que custaram 5000 euros para serem impressas, fora o transporte, advogado, um grande prejuízo. No Brasil não tem máquina grande, não dá para produzir grande. Tudo que a gente tem tentado fazer no Brasil cai no problema do preço, é muito caro produzir aqui ainda. No caso do Love Project que a gente fez uma segunda experiência que foi uma performance que a gente fez na Galeria Baró. Uma empresa chamada Akad topou participar, eles emprestaram pra gente duas impressoras, deram todo o material, deram todo o treinamento para a gente mexer com as impressoras. [...] A impressão 3D no Brasil ainda é muito utilizada para engenharia, para fazer uma peça muito funcional, tem pouquíssimo uso artístico e de design.” (IBID.).*



## 7.9 Entrevista Caroline Bos

Caroline Bos é arquiteta no escritório UNStudio, responsáveis por projetos na Holanda e no resto do mundo, no qual a complexidade de formas é uma das características marcantes. A entrevista ocorreu em São Paulo após o evento CAAD Futures no qual Bos foi *keynote*. A entrevista foi sobre os métodos de projeto utilizados pelo escritório, porém Bos atua na área de teoria do escritório e não pode responder algumas perguntas sobre tecnologias.

Uma das características da cultura Holandesa é prever situação e agir prevenindo, por exemplo, o comportamento de pessoas em um edifício. Sobre o método de projeto usado Bos (2015) explica:

*“Well I introduced a little bit, for instance, SWOT<sup>30</sup> analysis. We do a risk analysis of what are the strong points, weak points, opportunities and threats. When we make sort of a plan for a project plan, which also includes budget, we also make a sort of intern analysis of what we perceive as both the biggest opportunities and the biggest threats”.*

Sobre os programas computacionais usados no escritório Bos (*ibid.*) explica que Rhino e Grasshopper são os mais usados, porém a indústria da construção civil tem pressionado para o uso de BIM:

*“We are going into BIM now. And also GIS has come in with the urban unit. But Rhino and Grasshopper are the one that the architect designers use the most; they are all fluent in that. We never take in anyone who hasn't Rhino skills because then they would have nothing to do in the office. That is very important thing. And the technicians they are dealing more with other projects, but now the market push us a little bit more in the direction of BIM”.*

UNStudio tem uma abordagem das formas complexas muito interessante, pois as formas surgem com a definição do programa. No caso de teatros eles seguem um padrão de incorporar a torre de palco na volumetria (**Figura 136, Figura 137**). Bos (*ibid.*) explica:

*“[...] with the stage you always have a big tower for all the equipment. And you often get a box and a tower and we bring them together in one envelope. So that complex faceted shape comes actually from, in that case, that. So that the tower is sort of mast and incorporate it in the same skin as the rest of the building. [...] I think it responds to the location in terms of... there is almost like a view finder, this sort of upstairs balcony where you can see out. That is something that has a little bit of history, for instance very early projects of ours is called Karbouw, where also the first floor is a little bit separated from the ground floor”.*

---

<sup>30</sup> SWOT: ferramenta de análises, significa: Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats.

**Figura 136.** Theatre Agora Externo.

Fonte: UNStudio, 2007.

**Figura 137.** Theatre Agora Interno.

Fonte: UNStudio, 2007.

Bos (*ibid.*) também comenta sobre como projetar formas complexas pensando na fabricação digital; devido às dimensões de alguns dos projetos, é difícil adotar estratégias desde o início do projeto. A entrevista com Pieter Schreurs a seguir mostra o contrário. Bos explica como é a realidade no UNStudio:

*“It is very much in the beginnings, but it is very complex. Let’s say on a bigger project had the contractor will be subject to a tender process. So you cannot really in a very early stage work together with a particular manufacturer because the client will want to select the most competitive offer. So these things make that a very complex process, I mean you can do digital fabrication on a small project yourself maybe, but on a bigger project the process is much more complex. [...] We maybe like that, we might like to let’s say work together with a glazing manufacturer or a cladding panels or something right from the beginning. But the contracting process is such that then the client doesn’t get the best financial offer”.*

O novo ornamento na arquitetura também foi discutido brevemente. O envelope e o interior do edifício tendem a ser ornamentados, ou ter padrões, cores, formas, como em alguns projetos do UNStudio, assumindo uma função acústica importante no caso de um teatro. Bos (*ibid.*) comenta a sua visão do ornamento:

*“For instance, the acoustic paneling in our project in Graz is an example of that. Which is really a sort of experimentation of new ornament. [Figura 138][...] What you tried with the ceramics tridimensional tile in Qatar is very much the example of it. It is very double double, it is sort of a play with the logo, with logo of Qatar rail, making it tridimensional in sort of a flower. It really gives these vaults a tactile experience; I think it is fantastic that we can really bring the ornament. Again it requires very skillful handing [...]”.*



**Figura 138.** Music Theatre.



Fonte: UNStudio, 2008.

### 7.10 Entrevista Pieter Schreurs

Esta seção trata da entrevista realizada com o arquiteto Pieter Schreurs do escritório ONL, que explica o uso do projeto paramétrico e como eles produzem complexidade. O ONL foi fundado e é liderado pelo arquiteto Kas Oosterhuis e a artista Ilona Lénárd. Eles projetaram diversos prédios pelo mundo usando projeto computacional como uma ferramenta exploratória e para controle de dados do projeto. A entrevista completa encontra-se publicada na seção Entrevistas do Periódico Vitruvius – Schreurs (2015).

Schreurs fala sobre o processo de projeto e de manufatura da arquitetura. Ele explica sobre o projeto *A2 cockpit* (**Figura 139**) ressaltando a importância do arquiteto adquirir habilidades de programação, caso contrário seria impossível, por exemplo, desenhar milhares de elementos a mão. A implementação de um projeto de projeto completamente paramétrico não é uma tarefa fácil, demanda dos arquitetos novas habilidades, novos conhecimentos, novas abordagens do projeto. Apesar de alguns escritórios como ONL já terem implementado métodos contemporâneos de projeto há muitos anos, o projeto computacional não está totalmente popularizado.

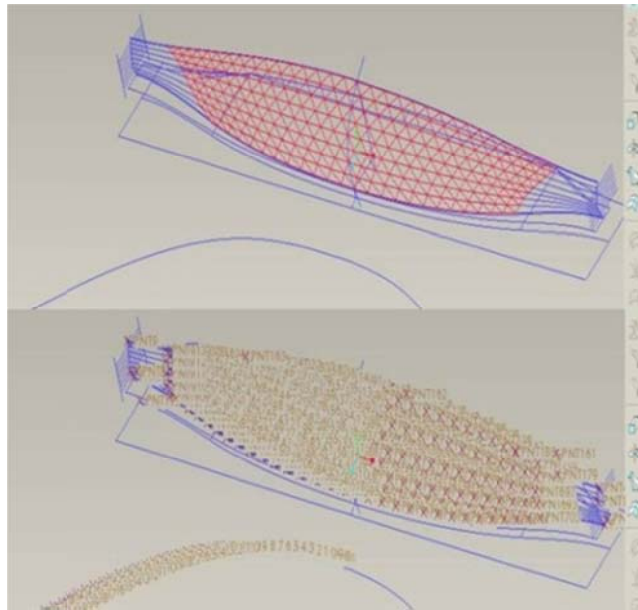
**Figura 139.** A2 Cockpit



Fonte: ONL, 2006

Schreurs (*ibid.*) começa explicando sobre como inicia um projeto:

*“[...] a lot of our designs are based on, let’s say, swarming technology, where you have individual nodes in space that define the position of the architectural elements on the overall shapes or building bodies. [Figura 140] [...] The point cloud forms the base of the architectural design in that sense, and everything is generated on that. So, our designs are always build on a certain logic that creates an integrated system, with which we start making the shape or that defines the complete shape of the building, so all components are generated based on that same logic”.*

**Figura 140.** Projeto paramétrico A2 Cockpit

Fonte: ONL, 2006.

Pieter explica que não usam SGs propriamente ditos para projetar os espaços, “[...] *but we use generative systems to create our structural systems and parametric details, which allows us to that and integrate design dynamically shaped complex building bodies, based on an integrated system with it’s own internal logics*” (IBID.). E que esse método de projeto permite criar e controlar formas de grande complexidade: “[w]e use digital tools and scripting to inform our design and allow for a rich complexity and design freedom, while integrating all boundary conditions” (IBID.).

No escritório ONL é utilizado Rhino e Grasshopper para fazer os projetos, mas a programação é essencial:

*“We used Python scripting as well. It really depends on the specific design and the requirements. We used Pro/Engineer and this kind of parametric engineering tools, because they are very accurate, the measures and geometry are very precise, which helps us controlling production geometry. But we have also used AutoCad for parametric design even, with AutoLISP routines to generate this kind of point clouds or logics and generate all different elements for the production. We also used tools like processing or sometimes also .net coding, like C# or Java to really making our own proprietary software to perform certain routines”* (IBID.).

Ainda falando sobre a programação como uma maneira de obter maior liberdade na criação de formas, Schreurs comenta: “[t]hat is actually how we also use these digital tools; basically we start programming to allow for a certain design freedom and to create the possibility to do complex shapes and different forms” (IBID.).

Um dos tópicos da entrevista com Schreurs foi a fabricação de complexidade. É importante integrar a fabricação desde o início do processo de projeto, esta é uma das qualidades dos trabalhos do ONL. Schreurs (*ibid.*) afirma:

*“All our designs are about file-to-factory production, so we integrate the thinking of about production process from the very first stages of design. I would say that is essential, if you to create more complex shapes and different geometries”.*

Ele acrescenta que a fabricação da complexidade dentro de um orçamento estabelecido depende do controle sobre a fabricação: “[t]o create a certain amount of design freedom within the bandwidth of your commission, you have to understand and control the production process” (*ibid.*).

Um dos diferenciais do processo de projeto no escritório ONL, comparando com as respostas de Corsi, Bos e Gauss é o controle sobre a fabricação. Isso pode chegar até ao ponto de controlar as máquinas por programação. Schreurs (*ibid.*) explica:

*“We go as far, that we basically shortcut the normal building production chain, where we actually control the machines and the logistic process directly from our models with which the building is designed. [...] All the tools that we used are already available at the factory. The only thing is that they use in a different way, we control them in a different way. A lot of these CNC machines are manually controlled, there is a guy typing in the number for radius of the bends, lengths of the elements or whatever. [...] We had to set up a complete chain from the design to the production facility to be able to do that. So we directly generate the information for CNC cutting machines to produce all the steel lengths and nodes [Figura 141]”.*

**Figura 141.** Elementos e nós fabricados.



Fonte: ONL, 2006.

A fabricação dos projetos do ONL, especificamente o projeto *A2 cockpit*, leva Schreurs (*ibid.*) a considerar que a programação é a única alternativa para realizar a obra: “[t]here is no other way then to control the production process to make that possible. There is

*no way that you can create that kind of variation and fluidity with traditional process, where somebody has to draw let's say ten thousand elements or something like that". A modelagem paramétrica é a essência dessa abordagem:*

*"One of the phrases we use is: "One building, one detail", so basic you design one parametric detail that allows, adapts to the required circumstances and certain point in the building. We have one envelope that changes if it is a roof, a side, a wall or a floor, but basic is the same detail" (IBID.).*

Schreurs (*ibid.*) resume o método de trabalho e descreve um problema que parece afetar arquitetos que trabalham com formas complexas:

*"Basically the aim is always to make sure that you, in all phases, control your parameters, which is also the budget of the building. You don't start designing in Rhino and then at the end of the design process you say: ok now somebody else resolves all the issues and sort of throw it over the fence... Because then you get the excessive budgets and costs overruns. That is what comes to mind of people when they think of complex building and shapes; you are not so much creating a complex design but a complicated design".*

Essa descrição feita acima se assemelha muito com o problema no projeto do estádio para Tokyo feito pela arquiteta Zaha Hadid, no qual a contratação de empreiteiras e fabricantes fez os custos subirem vertiginosamente. O mesmo pode ser visto na entrevista seguinte com Florian Gauss, onde ele comenta outro projeto de Zaha Hadid. Neste segundo caso foi necessário optar por mão de obra mais barata e um processo mais artesanal.

É importante destacar como o controle no processo de fabricação faz diferença:

*"[...] you can shortcut the chain of that traditional building process, so you start to control the production from your digital environment. It allows you to build complex designs, within a standardized budget, a standardized framework of the existing building industry in that sense" (IBID.).*

Isto também facilita a montagem do edifício:

*"You also cut in the building time for this kind of thing because you have a very straight forward system of setting up your whole structure. You make sure you have the right pieces and connect together. That will form your complex shape, your full geometry" (IBID.).*

No Brasil existe um parque industrial com máquinas disponíveis, como dito anteriormente na conversa com Corsi. Schreurs (*ibid.*) explica que o mesmo ocorre na Holanda: "[i]n the Netherlands that are some companies that have this kind of machinery available and maybe they don't know how to use it to its full potential, but they have in their

*workshops*”. Ou seja, mesmo em uma situação mais favorável na Holanda, ainda existem empresas que podem começar a fabricar partes do edifício para arquitetura.

O tema da impressão 3D foi explorado na conversa. Schreurs comenta sobre as dificuldades físicas e também de custos envolvendo a impressão 3D de objetos para arquitetura.

*“It is very limited at the moment, because the technology is not that far advanced to make high end product with it. That is one of the main issues also to transfer that to the building process and to actual build structures; because it is really difficult to get enough strength and to get a good enough finish basically” (IBID.).*

Para embasar sua visão ele comenta uma estimativa feita pelo escritório:

*“[...] a comparison what it would take to make the A2 cockpit building, to make the complex geometry of the nodes. It would take 9375 days, instead of 13 and cost 40.500.000€ instead of 135.000€ if they would be made in 3D printed steel instead of construction steel with file-to-factory production. [...] Also in this comparison, this nodes and the structure was made in 30 days and if you print in steel that it would be almost 10.000 days. That kind of time difference is a gap that is hardly bridgeable” (IBID.).*

Por fim, quando explicou o projeto *A2 cockpit*, Schreurs (*ibid.*) comentou sobre o efeito ornamental resultante da fabricação digital:

*“It is interesting also looking at 3D printing you can make your custom node, and make it really ornamental. This can take the idea that the detail becomes the architectural ornament to the next level. It can become completely purposefully designed, there is only material where it is needed to guide the forces and connect the different elements”.*

Perguntou-se então sua opinião sobre o ornamento contemporâneo e se está surgindo uma nova estética na arquitetura.

*“It does. As I would see it, it shouldn't become additive. When it becomes an integrated strategy then actually I think it becomes really aesthetically pleasing, the detail becomes the ornament. For instance, in the A2 cockpit or maybe in the climbing wall the fully integrated structure becomes an aesthetic, becomes the ornament. The detail or the design becomes the ornament. This is the backside of the climbing wall but has some interesting aesthetic. That also is very different in the way we approach to other offices do, then the ornament often becomes an overlay or addition. Of course, digital techniques always allow you to do that, but then it is merely functional as a façade layer or a dress. The full integration of that, the actual detail becomes the ornament itself and you get a full integrated aesthetics as well in terms of structure skin. The whole building starts to become one fluid integrated design” (ibid.).*



### 7.11 Entrevista Florian Gauss

Florian Gauss é engenheiro no escritório Teuffel Engineering e foi responsável por diversas obras de grandes arquitetos, trabalhando inclusive na ARUP. Na primeira parte da entrevista, Gauss fala sobre o processo de projeto usando GF. Os arquitetos do Grand Egyptian Museum, Heneghan Peng, usaram um fractal clássico, o triângulo de Sierpinski. É comum arquitetos usarem fractais quando é conveniente, neste caso para relacionar com as pirâmides. A entrevista completa encontra-se publicada na seção Entrevistas do Periódico Vitruvius – Gauss (2016).

As experiências anteriores de Gauss são importantes para compreender seu trabalho atualmente. Ele explica suas atividades junto ao escritório Arup e em seguida com Werner Sobek:

*“My first experiences with complex shape started when I was a member of the Advanced Geometry Unit in London at Arup, which was led by Cecil Balmond. Of course he was very much interested in complex shapes and form generating algorithms, such as fractals. At Arup we more or less worked in the front-end of the design to generate and create complex shapes. I left London at some point and went back to Stuttgart and led the geometry group at Werner Sobek. And it was much more focused on realization of complex shapes. The design was already given by others, the design architects, like Zaha Hadid or Jean Nouvel. And we were responsible to realize the given design in the end product. It was more about computation, producing all the information which you will require to be able to construct the facade mainly” (IBID.).*

Um dos trabalhos no qual foram usados fractais é a fachada do Grande Museu Egípcio (Figura 142) no Cairo, que fica em frente às grandes pirâmides. Gauss (*ibid.*) comenta sobre o fractal escolhido: “[t]his is a simple fractal the Sierpinski sieve which is of course a very nice and rational principle, creates a reciprocal grid adaptable to any triangle. It is quite a strong simple approach”. Gauss (*ibid.*) então explica a vantagem de usar um fractal para a estrutura da fachada:

*“Structurally you can say it is a sensible, is not something which is optimized; however it has a fairly useable internal organization for a structure. One beam spanning on the other one. Probably not the most efficient one, if you do it out of flat steel. However it always a trade off, needs to be a balance between your design inspirations, the methods which you have available for fabrication, of course structural and other impacts which are relative to your aspirations”.*

**Figura 142.** Fachada do Grande Museu Egípcio.

Fonte: Henegham Peng, 2003.

Uma tendência de projetos paramétricos com maior complexidade é a adoção de BIM, como visto na entrevista com Bos, Gauss (*ibid.*) explica quais programas utiliza: “*AutoCAD, Rhino Models, IFC<sup>31</sup> Models are getting more common now, coming out of Tekla or Revit*”. Gauss (*ibid.*) complementa: “*I think that Rhino with Grasshoper is the most powerful design tool in the market at the moment*”. No caso do Museu Egípcio, foi usado *Rhino scripting* para gerar o fractal e também os elementos estruturais:

*“So we did all the scripting in Rhino. For example for the Grand Egyptian Museum, for the fractal geometry of the translucent stone wall, the geometry was scripted in Rhino and also the file for structural analysis was also generated with a Rhino script. So the input for the structural software is just a text file which you take the information out of the model and dumped into a text file and you open it with the structural software”.*

Como o triângulo de Sierpinski possui uma regra que gera triângulos com uma similaridade em cada escala de 1/3 do tamanho do triângulo anterior, isso pode ser útil como solução estrutural. Gauss (*ibid.*) explica o processo:

*“You got six generations, in the middle you have the largest triangles which are always left open, and they will receive a cable net. The really nice thing is that the structural way of working is expressed in the hierarchy and in the depths of the beams. Because you have always the smaller hierarchy beam spanning on the higher hierarchy beam. You have large beams and the next ones are shorter, so they are smaller, they span on each other and they get smaller and smaller. Because the span of the beams always gets smaller, therefore the beam itself can be smaller. Has a real strong inner logic”.*

---

<sup>31</sup> Industry Foundation Classes



Desta maneira as vigas menores têm seções menores, porém ainda recebendo as cargas da fachada. Como os triângulos são colocados em um diferente nível a cada iteração, a programação então cria nós a cada geração e o *software* estrutural faz a conexão, Gauss (*ibid.*) explica:

*“[...] the structural software has a specific functionality that you can connect nodes together. What we did is each Sierpinski generation adds his own node, on different layers where it has to say and then we connect them rigidly together”.*

Como o projeto do museu não foi construído, Gauss (*ibid.*) comentou sobre a fabricação digital do Centro Cultural Heidar Alyiev da arquiteta Zaha Hadid: *“[t]he surface is about 35.000 square meters of GRC<sup>32</sup> or GRP<sup>33</sup> panel or individuals shaped curves and so on. And for that I developed the substructure which is holding up all the panels”*. Uma subestrutura foi necessária para sustentar os painéis da fachada, o qual foi fixada na estrutura espacial principal. Gauss (*ibid.*) explicou como recebeu a forma do projeto e dos painéis que compõe a fachada e cobertura (**Figura 143**):

*“[t]he surface was not rationalized. The surface was giving. It was not optimized. It was set by the architects; also the seams of the panels were given. Purely from aesthetic and architectural reason, there is no rationalization or fabrication issue behind it”.*

**Figura 143.** Instalação dos painéis Centro Cultural Heidar Alyiev.



Fonte: Gauss, 2011.

Isso então resultou em pontos de fixação na subestrutura, um detalhe que varia conforme a curvatura necessária, essa programação foi essencial para a fabricação. Gauss (*ibid.*) comenta: *“[n]ow that we set of this data we extracted the fabrication information, so you have the arc number, the length of the arc, the radius of the arc, also the point where you have to fix, for example, secondary elements and the fixings of the panel”*. Por outro lado como os painéis, aparentemente, não foram projetados considerando a fabricação, algumas situações que surgiram poderiam ter sido evitadas.

<sup>32</sup> GRC – Glass Reinforced Concrete

<sup>33</sup> GRP – Glass Reinforced Polyester

A primeira questão é a fabricação dos painéis, um processo de fabricação mais automatizado foi deixado de lado por questão de custo usando mão de obra mais barata de outro país. Gauss (*ibid.*) identifica os processos de fabricação:

*“They had a flexible plywood as a shutter. Initially the fabricator idea was to use an adjustable rig, so you have pins and balls which can screw up and down. And the design company already produced all the data for it, all the height level, so he had to screw up the pins. However they found out the process of doing it with timber mold, cut out of timber, and just hire a more cheap labor was easier and cheaper than this adjustable shutter. He did it just with a lot of people from India or Sri Lanka, because it was produced in Dubai”.*

Supostamente se o controle do processo de fabricação fosse iniciado deste o início do projeto, como visto na entrevista com Schreurs, essa situação poderia ter levado à um processo mais automatizado com um custo controlado. Gauss (*ibid.*) comenta que a possibilidade de criar alguma otimização poderia reduzir custos ao reaproveitar os moldes dos painéis: *“[i]f you have a flat mold which has always the same parts, then you are going to do it in steel and you can use it a hundred thousand times”.*

A segunda questão foi o trabalho de desenho feito manualmente (Figura 144), devido algumas das curvaturas adotadas. Gauss (*ibid.*) explica:

*“Of course, the substructure of the edges where pure hand work, because there was no rule given, there was no rule applicable to create the curve. Somebody just modelled all the substructure beams by hand for an half of year, because there was no way to get it done parametrically or with a programming approach. You only have exceptions, only a human can judge what we are going to do here [the center]”.*

**Figura 144.** Fabricação manual dos painéis.



Fonte: Gauss, 2011.

Gauss conclui que os processos de fabricação (digitais ou não) em arquitetura são o que encarecem a fabricação, *“because you have to fabricate individual parts which first might be an expensive way of fabricating it”.* Gauss (*ibid.*) continua a explicação:

*“The less fabrication steps you have, the less are the costs. The more you have to do get the shapes, the higher are the costs. If you just take a tube and cut it is cheap, if you have to bend it a single way it adds costs, but maybe it is ok. But then if you have to introduce a helicoid bending it is more complex and costly way of fabricating it”.*

Por fim, Gauss (*ibid.*) comenta sua visão sobre o uso de fractais na arquitetura, lembrando que os fractais podem ser usados de diversas maneiras como visto no capítulo 4:

*“I think the problem with fractals is inherent because when you generate very small pieces, which are very inefficient and expensive. You have a lot of joints. So it is large as you can fabricate them. If you do them smaller then it is an extra cost, you have to weld them or bolt them and coordinate the whole stuff. What you maybe you can do is make one large piece and then you can fractalize it”.*

O processo de projeto do Centro Cultura Heydar Aliyev foi parcialmente automatizado; Zaha Hadid optou por não racionalizar as superfícies. Isso gerou painéis totalmente diferentes e uma subestrutura especial para suportá-los. Também demandou que uma pessoa modelasse manualmente a subestrutura por seis meses. Apesar de toda automação envolvida no processo de projeto, ainda foi mais barato contratar trabalho humano na Índia para produzir cada painel.

## 7.12 Entrevista ARM

Esta seção analisa a entrevista realizada com Howard e Mark Raggatt do escritório ARM em Melbourne, focando nos métodos como esses arquitetos exploram a complexidade. Durante a entrevista, Howard faz questão de enfatizar o discurso político e provocativo de sua arquitetura, enquanto que Mark explica os processos de projeto computacional e a fabricação digital.

### **Storey Hall**

ARM tem uma abordagem da arquitetura com superfícies ornamentadas e ricas em formas expressando uma agenda social, por isso se consideram como arquitetos Barrocos ao mesmo tempo usando recursos tecnológicos para sua produção. Howard (RAGGATT, RAGGATT, 2015) começa explicando o processo de projeto do edifício RMIT Storey Hall em Melbourne, e os motivos pelos quais optaram pelo ladrilho de Penrose como detalhe.

*“We used the Penrose tiles, which don’t properly fall under the same category as fractals. But they certainly touch on that idea of a new mathematics. [...] The Penrose tiles are two tiles, a fat one and a thin one, but the rules that make it aperiodic have to do with how they are arranged, how they fit together. Those rules can be inscribed on the tiles themselves, which you can see in the banding of the tiles on Storey Hall. If a tile is misplaced the system collapses, you won’t be able to put a tile in, according to the rules. We do that on the face of Storey Hall, look up and you’ll see there is a missing tile which, I guess we did it on purpose, we broke the rules”.*

A fachada do Storey Hall (**Figura 145**), construído em 1996, foi fabricada ainda com uma tecnologia tradicional de moldes feitos a mão pelo próprio Howard, um processo bastante artesanal. Enquanto que o conceito do ladrilho de Penrose foi gerado computacionalmente. Howard (*ibid.*) explica o processo de fabricação dos painéis de bronze da fachada repletos de significados, ainda com um método artesanal:

*“The tiles are like this, a combination of geometry and rules, of matter and consciousness. We made them as if they were made by craftsmen, to look like a sort of a fabric. There is rope and strips of lace, a garter belt and bits of fabric and aluminium sheet. There were things there about the history of the building itself. Particularly, a suffragist feminist pacifist sort of organisation that occupied the building, and in fact that Storey Hall was built by the Hibernian Catholic community of Melbourne in the 1860’s. The dominant powers of Melbourne at that time were Protestants who oppressed the Catholics, and we wanted our building to register this history somehow. So the colour green, for instance, belongs to the Irish Catholic community but also to the suffragists, they had a flag that was green, white and purple.*

*There are a whole lot of symbolisms I suppose. [...] So Storey Hall looks like a baroque building in a way. It has a lot of those issues about the baroque: the totalising of the interior, the totalising of the exterior, the notion of the figuration as well as form making. But filtered through contemporary technology and philosophy”.*

**Figura 145.** Storey Hall e RMIT 22.



Fonte: Do autor, 2016.

### **Processo Computacional**

Sobre o processo computacional no projeto, ARM vem há muito tempo utilizando a programação, por exemplo, Mark (*ibid.*) explica neste trecho o que mudou para os dias atuais:

*“There is a LISP routine that does the drawing. I mean this LISP routine is from 1991. We have published this routine because we believe it is important to show the proof, the rigor of the process. ARM hired a mathematician and a computer programmer to write the script. Now, we can do it in an afternoon because the tools have become proprietary but then it was necessary to make the tools in order to create the design”.*

Ao ser questionado sobre a existência de uma equipe de especialistas em computação, Mark responde que os próprios arquitetos escrevem os códigos com Grasshopper e MaxScript hoje em dia. Por outro lado as ferramentas computacionais entram no processo de projeto logo após o conceito do projeto ser discutido e desenhado mão. Mark (*ibid.*) explica essa abordagem:

*“We use Grasshopper, some MaxScript as well, Python is less popular here. Strangely we tend not to work from the script out; we tend to work from the idea in. There is a lot of talking and drawing, and then the script develops with that conversation”.*

Um dos projetos no qual utilizaram a fabricação digital intensamente foi o edifício 22 do RMIT, apelidado de cérebro verde, situado ao lado do Storey Hall. Na **Figura 146** observa-se a forma orgânica verde que serve como marquise encontrando a entrada do Storey Hall, cuja concepção também foi a partir da geometria do ladrilho de Penrose. Mark (*ibid.*) explica o conceito:

*“Well, we have been fortunate enough to return to Storey Hall by way of a neighbouring RMIT project, the Green Brain, which is next door. Storey Hall was finished in 1996 and it is all bronze handcrafted but our more recent commission has a distinctive but familiar geometry. The soft geometry is still the Penrose Tiles but this time instead of detailed craft and precisely mathematical symmetry, the contemporary mathematics is so complex as to have no edges, to be indistinct. Like the closer you get to something, the harder it is for you to see”.*

**Figura 146.** Detalhe Storey Hall e RMIT 22



Fonte: Do autor, 2016.

### **Fabricação Digital**

Mark (*ibid.*) continua a falar sobre a fabricação do edifício RMIT 22, no qual foi necessário buscar parceria com uma indústria de barcos que possibilitou a fabricação digital do projeto. Na Austrália, como no Brasil, também há uma necessidade de ampliar o universo da fabricação digital na arquitetura.

*“In terms of fabrication, rather than being a handcrafted bronze, we modeled the pieces entirely digitally, there are almost no drawings done for that building. And then we worked with a fabricator who printed out the building. From conception to delivery the project is born out of an entirely digital process. The engineering is all done directly on the meshes themselves. The firm we worked with, MouldCAM, make yachts. So they are used to dealing with incredible*



*live loads and unpredictable forces. Something like this, architecture, is easy, like child's play”.*

Em outros projetos, eles usaram moldes usinados com máquinas CNC para concreto, em um processo de fabricação mais disseminado na construção civil.

*“Parts of the National Museum of Australia and Australian Institute of Aboriginal and Torres Strait Islander Studies façades are made up of large digitally moulded concrete panels. They are painted black and look almost like rubber [Figura 147]. They have a sinusoidal form and the interesting digital quirk of this is that ARM took the simple sinusoidal graph and wrapped it around a cylinder” (IBID.).*

O Museu Nacional da Austrália tem como partido arquitetônico um nó gigante dentro de uma caixa. Em um processo subtrativo o nó é removido deixando então um grande espaço vazio. O processo de projeto precisou de recursos digitais para a concepção e principalmente para evitar a dupla-curvatura de superfícies, já que essa corda imaginária tende a torcer para criar o nó. A busca pela complexidade aqui está em um estágio bastante avançado no qual as soluções para a fabricação já são consideradas no processo de projeto.

Mark (*ibid.*) comenta:

*“It's an incredibly complex space and doing very strange things but of course they are all developable surfaces, they only ever curve in one direction. So it's relatively cheap to build, you're not having to build complex surfaces, you don't have to use 3D print moulds for example; you are within standard skills, standard building techniques, it's a cunning method!”.*

**Figura 147.** Painel de concreto ornamentado.



Fonte: Raggatt e Ward (2015).

**Figura 148.** Painéis acústicos ornamentados.



Fonte: Raggatt e Ward (2015).

## Ornamento

Mark (*ibid.*) explica o ornamento assumindo uma função de controle acústico no projeto Melbourne Recital Centre (**Figura 148**), similar ao projeto explicado por Bos, com o mesmo entendimento do ornamento contemporâneo:

*“The fabrication process allows us to conflate both function and ornament into one gesture. We see that in the Green Brain but you can also see it in the National Museum, the Melbourne Shrine of Remembrance and in the Melbourne Recital Centre (MRC). The central function of the MRC is a room that performs acoustically but also visually. Part of our analysis and proposition was to say that baroque recital music comes from baroque dance halls, and the reason the music sounds that way is because the rooms were designed in a certain way, they were designed for parties. And they perform because of their materials and because of their ornament. The room creates the music and the music creates the room; so the ornament is its meaning, its content, its aesthetic and a fundamental element in its function”.*



## 8 Aplicações

*“Calculating with shapes is an open-ended process – like art and design. You’re always free to try another rule”* George Stiny.

Existem diversas maneiras de utilizar fractais em arquitetura como já visto nos capítulos anteriores. Neste capítulo são explicadas algumas aplicações dos fractais com o objetivo de explorá-los no projeto. São exercícios que vão desde a programação de fractais clássicos até a elaboração de projetos e fabricação de protótipos. Este capítulo está dividido em duas partes, em um primeiro momento a implementação computacional de fractais, explorando as ferramentas disponíveis e na segunda parte as aplicações em projeto.

A maneira de trabalhar com os fractais como SG possui algumas peculiaridades, como explica Harris (2012:262), as quais foram consideradas nestes exercícios:

*“By generating a fractal iteration by iteration, you can understand the nature and consequence of the various relationships that constitute the composition. Through this understanding, the designer can make the modifications necessary to achieve the design objectives”.*

### 8.1 Implementação computacional de fractais

A primeira parte desta seção trata da implementação de fractais com recursos computacionais, visando a possível aplicação em projeto de arquitetura.

### 8.2 Aplicativos para gerar fractais 3D

Para a área da matemática existem inúmeros programas computacionais para a geração de fractais não lineares, como conjuntos de Julia ou de Mandelbrot. Alguns exemplos desta tese foram gerados com o programa Chaoscope, por exemplo. Contudo, esses programas geralmente são difíceis de controlar ou de transportar as formas para um programa CAD, pois geram iterações infinitas. Também não são apropriados para o uso em arquitetura, pois estão focados puramente na realização matemática dos fractais. Com exceção do trabalho de Jansen, apresentado na seção 3.2, o qual usou recursos avançados de computação que fizeram a ponte com programas CAD para gerar arquivos 3D com um número finito de iterações e em seguida gerar arquivos STL.

As aplicações a seguir, controlam parametricamente a geração de fractais lineares possibilitando ao arquiteto melhor compreensão do sistema iterativo a cada geração.

### 8.3 Linguagem textual: VBA

Desenvolveu-se esta aplicação para disciplina Automação do Projeto do programa de Pós-graduação Arquitetura, Tecnologia e Cidade da Unicamp. Os resultados do experimento aqui descritos encontram-se publicados em maior detalhe em Sedrez, Meneghel, Celani (2013). O fractal clássico, triângulo de Sierpinski foi escolhido como exemplo para ser criado utilizando-se programação em VBA.

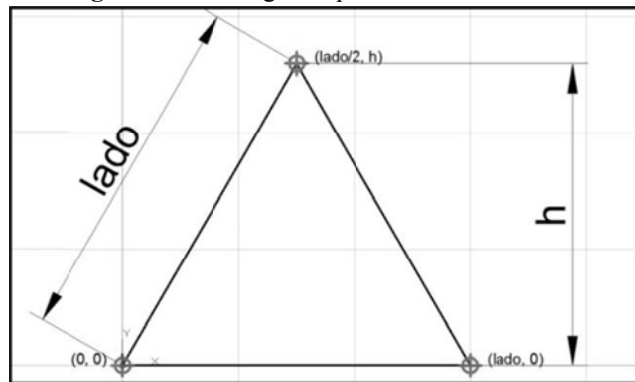
O triângulo Sierpinski, é um objeto fractal formado por um processo recursivo cujas regras de produção são:

- a) Objeto inicial: um triângulo qualquer em um plano. O triângulo modelo é um triângulo equilátero com a base paralela ao plano horizontal;
- b) Primeira Iteração: Copiar três vezes o objeto inicial e escalar as cópias pela metade, posicionando-as de maneira a gerar um triângulo invertido no centro do objeto inicial. (Outra maneira seria unir os pontos médios de cada lado do objeto inicial, excluindo o triângulo central);
- c) Repetir o passo 2 em cada um dos triângulos copiados.

A etapa 1 deste exercício consistiu em verificar de que maneira o objeto Triângulo de Sierpinski poderia ser construído no AutoCAD. Iniciou-se então, a implementação do código com três variáveis principais: Lado, Altura (H) e um vetor de nove posições, denominado vetor Triângulo (0 to 8).

O lado iniciava com um valor fixo dentro do algoritmo, a altura era dada por uma função matemática com relação à variável lado e o vetor estocava as coordenadas de cada ponto do triângulo equilátero. As seis primeiras posições do vetor eram: 0,0; Lado,0; e Lado/2,H. As duas últimas posições recebiam as coordenadas do primeiro ponto, para desenhar a linha base do triângulo (Figura 149).

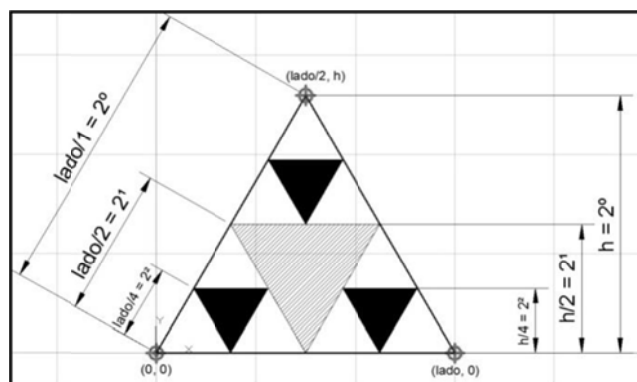
Figura 149. Triângulo equilátero e coordenadas.



Fonte: Sedrez, Meneghel, Celani, 2013.

Na etapa 2, as duas primeiras iterações de Sierpinski foram implementadas manualmente. Foram estudadas as coordenadas dos pontos médios de cada lado do triângulo para popular o vetor de primeira fase do fractal e, com isso, gerar a primeira iteração de Sierpinski. O mesmo estudo foi aplicado na segunda iteração (Figura 150), verificando os pontos médios do triângulo de fase anterior. Em um segundo momento, constatou-se que havia uma progressão geométrica nas coordenadas dos vértices dos triângulos.

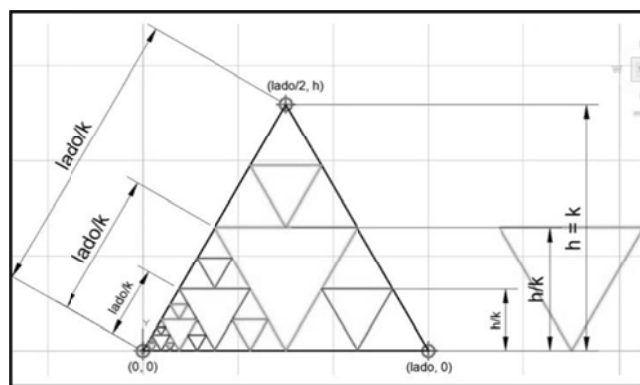
Figura 150. Estudo com duas iterações.



Fonte: Sedrez, Meneghel, Celani, 2013.

A etapa 3 do exercício teve a finalidade de desenvolver um código automatizado. Foi criada uma constante “K” dentro de um *loop* de repetição. Esse *loop* era definido pela variável que determinava o número de iterações do fractal. A constante foi desenvolvida sob uma função matemática que representa uma progressão geométrica na potência de 2 constatada na segunda etapa. Essa fase apresentou padrões ao desenhar os triângulos sob o estudo das coordenadas dos eixos X e Y. Os padrões eram verificados através da aplicação de cores sequenciais nos triângulos a cada iteração de Sierpinski. A **Figura 151** mostra o objeto obtido nessa etapa.

**Figura 151.** Estudo com automação do código.



Fonte: Sedrez, Meneghel, Celani, 2013.

Na etapa 4 decidiu-se modificar os princípios geradores da forma com a mudança estratégica e trabalhando com outras possibilidades de implementação. Depois dos estudos realizados nas etapas anteriores e de algumas ideias levantadas, encontrou-se a solução que se aplica aos três eixos do triângulo principal e forma um triângulo fractal.

Foi desenvolvido o seguinte algoritmo:

- A. Fazer uma varredura em busca de qualquer objeto no plano.
- B. Verificar se o objeto encontrado é o menor triângulo até o momento.
- C. Caso a alternativa anterior seja verdadeira, copiar três vezes a geometria encontrada e escalar as cópias pela metade a partir de cada um dos três vértices do triângulo.
- D. Repetir o passo “b” até atingir o número de iterações de Sierpinski escolhida pelo usuário.

Para a implementação do código citado, criou-se uma função *for each* para varrer a área de trabalho em busca de entidades do AutoCAD, neste caso, triângulos. A cada triângulo encontrado, é feita uma cópia do mesmo, sob o fator de escala 1/2, processo repetido três vezes a partir dos vértices do triângulo: 0,0; Lado,0; e Lado/2, H.

Além disso, o algoritmo trabalha sob 3 *loops* de repetições. O primeiro e mais abrangente é o contador do número de iterações de Sierpinski. Ele conhece o número máximo de iterações que o usuário definiu e, por isso, é responsável por finalizar o fractal. O segundo *loop* varre a área em que estava sendo geradas as geometrias, em busca de triângulos. Ao encontrar um triângulo, verifica se o mesmo é a menor porção do fractal até o momento. Caso esta condição seja verdadeira, um terceiro *loop* é iniciado.

Este último *loop* tem a finalidade de percorrer um vetor de 9 posições chamado `vetorBasePoint(0 to 8)`. Essa sequência contém as coordenadas X e Y dos três vértices do triângulo principal. Ao final, o algoritmo desenha um triângulo equilátero de Sierpinski no `modelSpace` do AutoCAD.

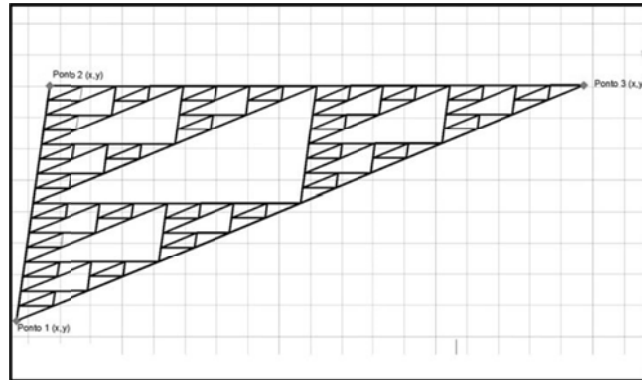
Abaixo segue a implementação do algoritmo desenvolvida nessa etapa:

```
'Fractal
  For i = 1 To numSierpinski
    'Varredura em busca de entidades do Autocad
  For Each myentity In ThisDrawing.ModelSpace
    'Verifica se a entidade encontrada é o menor triangulo de Sierpinski
      If myentity.Color = i Then
        'Percorre o vetor de nove posições atribuindo as coordenadas dos pontos do
        triângulo principal.
        For j = 0 To 2
          outroP(0) = basePointMain(j * 3 + 0)
          outroP(1) = basePointMain(j * 3 + 1)
          outroP(2) = basePointMain(j * 3 + 2)
        'Copia e escala o objeto
        Set trianguloCopyPL = myentity.Copy()
          trianguloCopyPL.ScaleEntity outroP, ScaleFactor
        'Atribui uma cor para identificação da iteração de Sierpinski
        trianguloCopyPL.Color = i + 1
        Next j
      End If
    Next
  Next i
```

A etapa final consistiu em melhorias do código e inclusão de objetivos. Decidiu-se trabalhar com a iteração de Sierpinski para triângulos genéricos, sendo que a definição do

tamanho, posição e o tipo de triângulo são opções do usuário. Implementou-se um algoritmo, seguindo o mesmo código da etapa anterior, porém que espera do usuário cliques do mouse no *modelSpace* do AutoCad, para que os três vértices do triângulo sejam definidos. Uma vez feito isso, o programa solicita ao usuário o número de iterações de Sierpinski e, ao final, desenha o triângulo fractal desejado pelo usuário (**Figura 152**).

**Figura 152.** Objeto com 4 iterações para triângulos genéricos.



Fonte: Sedrez, Meneghel, Celani, 2013.

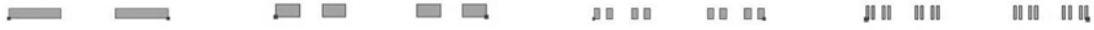
#### 8.4 Linguagem textual: Python

Para esta implementação, alguns tutoriais *online* e livros serviram como orientadores para a aprendizagem da linguagem Python. O objetivo foi conhecer uma linguagem cuja utilização está em expansão por ser de fácil compreensão, além de permitir a programação com componentes do Grasshopper. Foram selecionados alguns fractais clássicos para serem programados com Grasshopper e Python, usando inputs do Rhinoceros (ponto ou linha): Conjunto de Cantor, Curva de Koch, Ilha de Koch, Curva de Minkowski, Curva de Peano, Curva Dragão e Triângulo de Sierpinski.

Para alguns fractais foram criadas variações, procedimento semelhante ao encontrado no livro de Terzidis (2006). Uma das dificuldades encontradas na programação em Python com Grasshopper é a visualização dos dados gerados e alterações no código. Faz-se necessário criar rotinas alternativas para verificar se o código escrito está de acordo com o desejo do programador.

## Conjunto de Cantor (Figura 153)

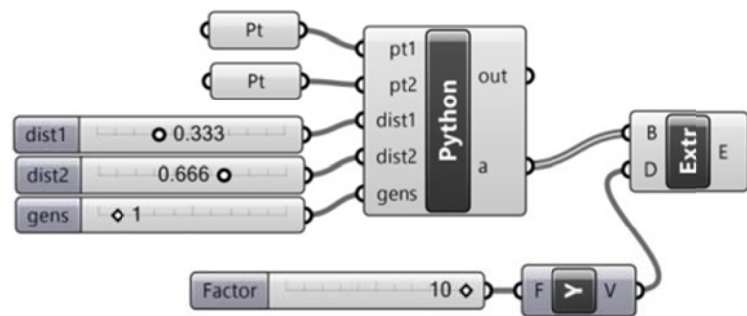
Figura 153. Iterações 1 a 4 do Conjunto de Cantor.



Fonte: Do autor, 2016.

## Código Grasshopper (Figura 154)

Figura 154. Componente Python para Conjunto de Cantor.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura Inicial: reta

Pt1 = Ponto inicial

Pt2 = Ponto final

Iteração: dividir a reta em três segmentos iguais, desconsiderar o segmento central.

Dist1= Distância para o fim do primeiro segmento

Dist2= Distância para o fim do segundo segmento

Gens= Número de iterações

(A extrusão no final do código é para possibilitar uma melhor visualização do fractal).

Código Python:

```
import rhinoscriptsyntax as rs
def cantor(v1,v2):
    dist= rs.Distance(v1,v2)
    p1=v2-v1
    p1=rs.VectorUnitize(p1)
    p1 *= dist*dist1
```

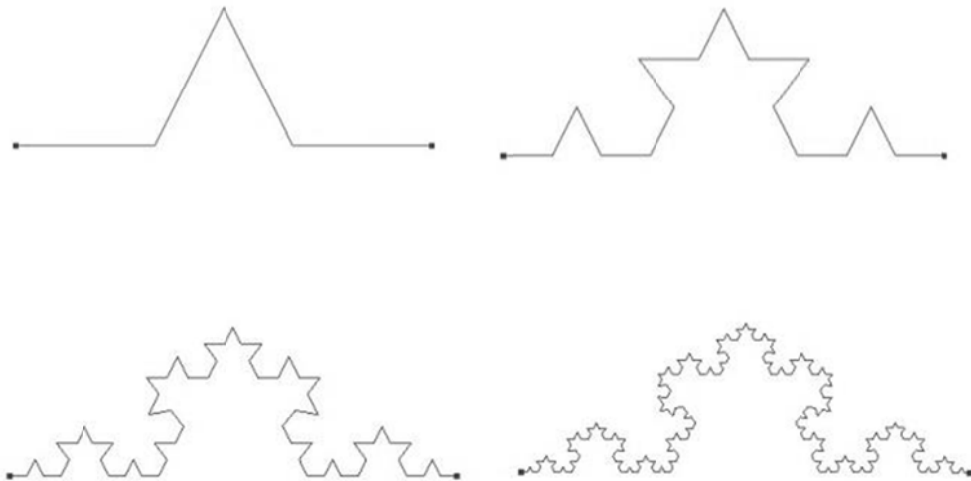
```

p1 += v1
p2=v2-v1
p2=rs.VectorUnitize(p2)
p2 *= dist*dist
p2 += v1
return [v1,p1,p2,v2]
def recursive(v1,v2,gens, lineList):
    if(gens>0):
        newPts = cantor(v1,v2)
        la=rs.AddPolyline([newPts[0], newPts[1]])
        lb=rs.AddPolyline([newPts[2],newPts[3]])
        if(gens==1):
            lineList.append(la)
            lineList.append(lb)
        recursive(newPts[0],newPts[1], gens-1, lineList)
        recursive(newPts[2],newPts[3], gens-1, lineList)
    return lineList
allLines=[]
a=recursive(pt1,pt2,gens, allLines)

```

### Curva de Koch (Figura 155)

Figura 155. Iterações 1 a 4 da curva de Koch.

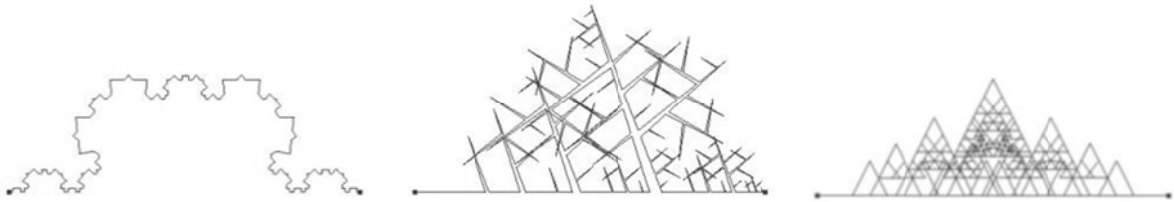


Fonte: Do autor, 2016.



### Variações produzidas (Figura 156)

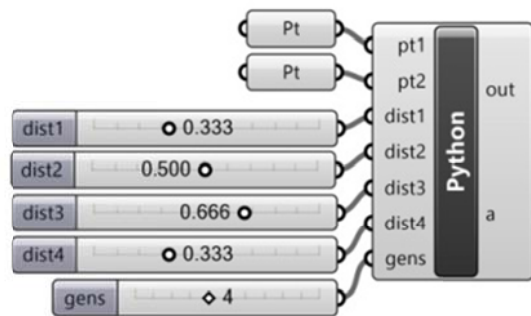
Figura 156. Três variações de parâmetros no código.



Fonte: Do autor, 2016.

### Código Grasshopper (Figura 157)

Figura 157. Componente Python para curva de Koch.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura inicial: reta

Pt1= Ponto inicial

Pt2= Ponto final

Iteração: dividir a reta em 3 partes iguais, criar na metade da reta um ponto deslocado 90°, conectar os pontos.

Dist1= cria o segundo ponto da reta

Dist2= cria o ponto central

Dist3= cria o terceiro ponto da reta

Dist4= controla o deslocamento do ponto central

Gens= número de iterações

## Código Python

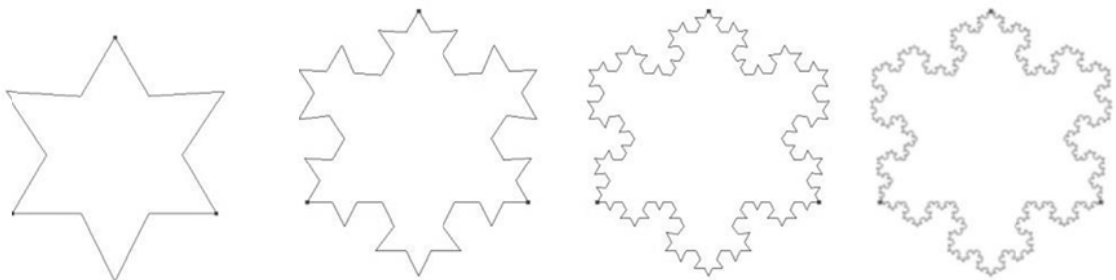
```

import rhinoscriptsyntax as rs
def koch(v1,v2):
    dist=rs.Distance(v1,v2)
    p1=v2-v1
    p1=rs.VectorUnitize(p1)
    p1 *=dist *dist1
    p1 +=v1
    p2=v2-v1
    cross=v2-v1
    cross=rs.VectorUnitize(cross)
    cross=rs.VectorRotate(cross, 90, [0,0,1])
    cross*=dist*dist4
    p2=rs.VectorUnitize(p2)
    p2 *=dist *dist2
    p2 +=v1 + cross
    p3=v2-v1
    p3=rs.VectorUnitize(p3)
    p3 *=dist *dist3
    p3 +=v1
    return [v1, p1, p2, p3, v2]
def recursive(v1, v2, gens, lineList):
    if(gens>0):
        newPts = koch(v1,v2)
        l = rs.AddPolyline([newPts[0], newPts[1],newPts[2],newPts[3],newPts[4]])
        if(gens==1):
            lineList.append(l)
            recursive (newPts[0], newPts[1], gens-1, lineList)
            recursive (newPts[1], newPts[2], gens-1, lineList)
            recursive (newPts[2], newPts[3], gens-1, lineList)
            recursive (newPts[3], newPts[4], gens-1, lineList)
    return lineList
allLines=[]
a=recursive(pt1,pt2,gens,allLines)

```

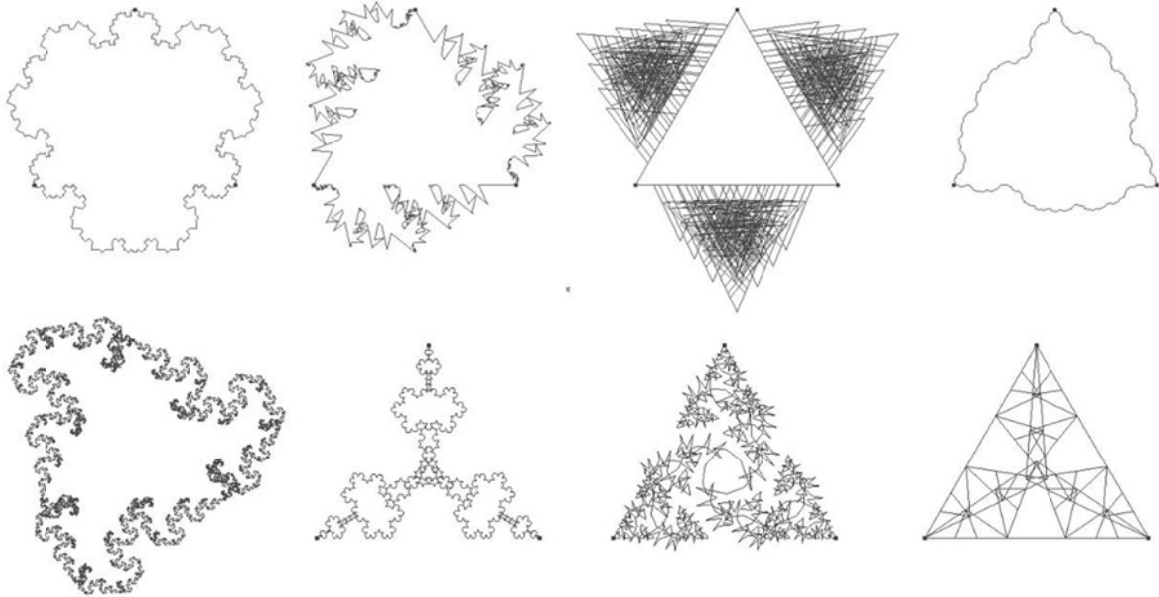
## Ilha de Koch (Figura 158)

Figura 158. Quatro iterações da Ilha de Koch.



### Variações produzidas (Figura 159)

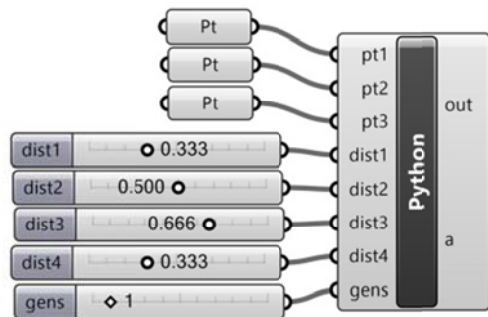
**Figura 159.** Oito variações da Ilha de Koch.



Fonte: Do autor, 2016.

### Código Grasshopper (Figura 160)

**Figura 160.** Componente Python para Ilha de Koch.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura inicial: triângulo

Pt1= Primeiro vértice

Pt2= Segundo vértice

Pt3= Terceiro vértice

Iteração: dividir cada lado em três partes, criar na metade da reta um ponto deslocado 90°, conectar os pontos.

Dist1= cria o segundo ponto da reta

Dist2= cria o ponto central

Dist3= cria o terceiro ponto da reta

Dist4= controla o deslocamento do ponto central

Gens= número de iterações

Código Python

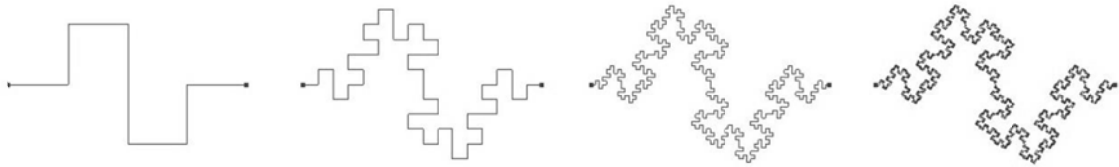
```

import rhinoscriptsyntax as rs
def kochsn(v1,v2):
    dist= rs.Distance(v1,v2)
    p1=v2-v1
    p1=rs.VectorUnitize(p1)
    p1 *= dist*dist1
    p1 += v1
    p2=v2-v1
    cross = v2-v1
    cross = rs.VectorUnitize(cross)
    cross= rs.VectorRotate(cross, 90, [0,0,1])
    cross *= dist * dist4
    p2=rs.VectorUnitize(p2)
    p2 *= dist*dist2
    p2 += v1 + cross
    p3=v2-v1
    p3=rs.VectorUnitize(p3)
    p3 *= dist*dist3
    p3 += v1
    return [v1,p1,p2,p3,v2]
def recursive(v1,v2,gens,lineList):
    if(gens>0):
        newPts = kochsn(v1,v2)
        l=rs.AddPolyline([newPts[0], newPts[1],newPts[2],newPts[3],newPts[4]])
        if(gens==1):
            lineList.append(l)
            recursive(newPts[0],newPts[1], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[1],newPts[2], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[2],newPts[3], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[3],newPts[4], gens-1, lineList)
        return lineList
allLines=[]
a=recursive(pt1,pt2,gens,allLines) and recursive(pt2,pt3,gens,allLines) and
recursive(pt3,pt1,gens,allLines)

```

Curva de Minkowski (Figura 161)

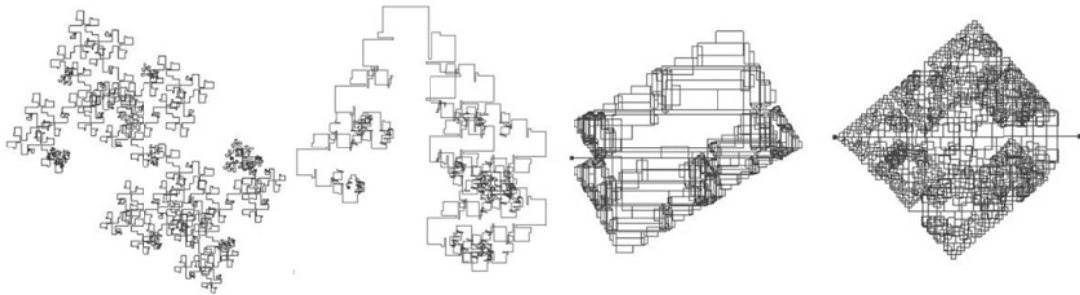
Figura 161. Quatro iterações da curva de Minkowski.



Fonte: Do autor, 2016.

Variações produzidas (Figura 162)

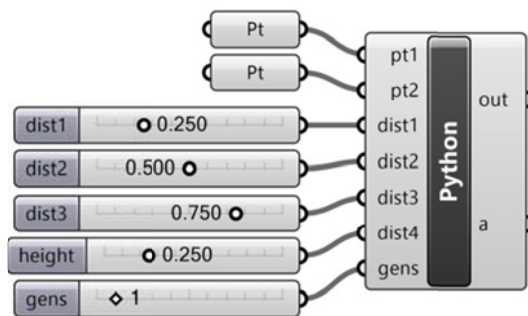
Figura 162. Quatro variações da curva de Minkowski.



Fonte: Do autor, 2016.

Código Grasshopper (Figura 163)

Figura 163. Componente Python para curva de Minkowski.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura inicial: reta

Pt1= Ponto inicial

Pt2= Ponto final

Iteração= Dividir a reta em quatro segmentos iguais, girar os segmentos para formar a figura inicial.

Dist1= cria o segundo ponto da reta

Dist2= cria o ponto central

Dist3= cria o terceiro ponto da reta

Dist4= controla o deslocamento do ponto central

Gens= número de iterações

Código Python

```
import rhinoscriptsyntax as rs
def mink(v1,v2):
    dist= rs.Distance(v1,v2)
    p1=v2-v1
    p1=rs.VectorUnitize(p1)
    p1 *= dist*dist1
    p1 += v1
    p2=v2-v1
    cross = v2-v1
    cross = rs.VectorUnitize(cross)
    cross= rs.VectorRotate(cross, 90, [0,0,1])
    cross *= dist * dist4
    p2=rs.VectorUnitize(p2)
    p2 *= dist*dist1
    p2 += v1 + cross
    p3=v2-v1
    cross = v2-v1
    cross = rs.VectorUnitize(cross)
    cross= rs.VectorRotate(cross, 90, [0,0,1])
    cross *= dist * dist4
    p3=rs.VectorUnitize(p3)
    p3 *= dist*dist2
    p3 += v1 + cross
    p4=v2-v1
    cross = v2-v1
    cross = rs.VectorUnitize(cross)
    cross= rs.VectorRotate(cross, -90, [0,0,1])
    cross *= dist * dist4
    p4=rs.VectorUnitize(p4)
    p4 *= dist*dist2
    p4 += v1
    p5=v2-v1
    cross = v2-v1
    cross = rs.VectorUnitize(cross)
    cross= rs.VectorRotate(cross, -90, [0,0,1])
    cross *= dist * dist4
    p5=rs.VectorUnitize(p5)
```

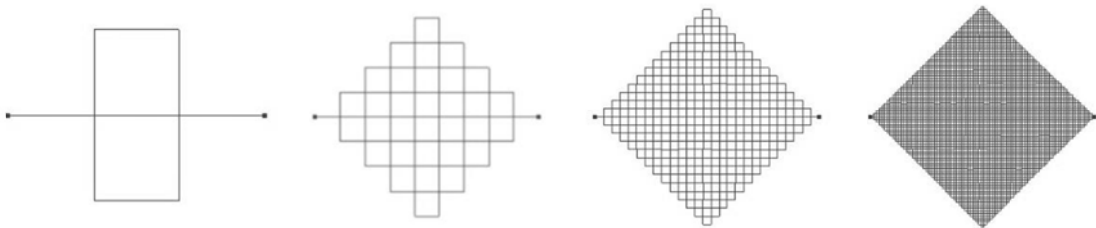
```

p5 *= dist*dist2
p5 += v1+cross
p6=v2-v1
cross = v2-v1
cross = rs.VectorUnitize(cross)
cross= rs.VectorRotate(cross, -90, [0,0,1])
cross *= dist * dist4
p6=rs.VectorUnitize(p6)
p6 *= dist*dist3
p6 += v1 + cross
p7=v2-v1
p7=rs.VectorUnitize(p7)
p7 *= dist*dist3
p7 += v1
return [v1,p1,p2,p3,p4,p5,p6,p7,v2]
def recursive(v1,v2,gens, lineList):
    if(gens>0):
        newPts = mink(v1,v2)
        l=rs.AddPolyline([newPts[0],
newPts[1],newPts[2],newPts[3],newPts[4],newPts[5],newPts[6],newPts[7],newPts
[8]])
        if(gens==1):
            lineList.append(l)
            recursive(newPts[0],newPts[1], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[1],newPts[2], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[2],newPts[3], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[3],newPts[4], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[4],newPts[5], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[5],newPts[6], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[6],newPts[7], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[7],newPts[8], gens-1, lineList)
        return lineList
allLines=[]
a=recursive(pt1,pt2,gens,allLines)

```

### Curva de Peano (Figura 164)

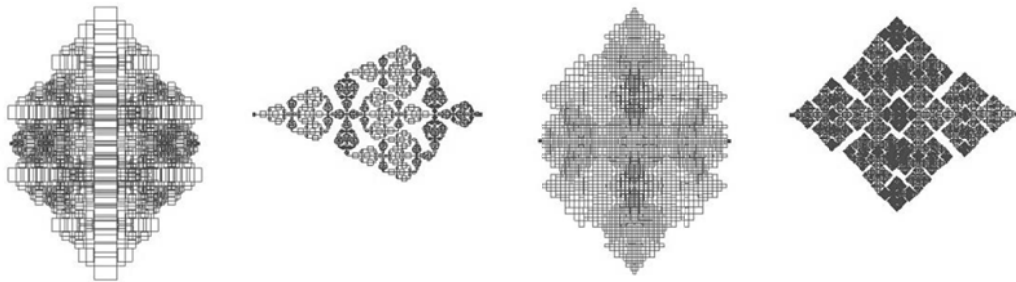
Figura 164. Quatro iterações da curva de Peano.



Fonte: Do autor, 2016.

### Variações produzidas (Figura 165)

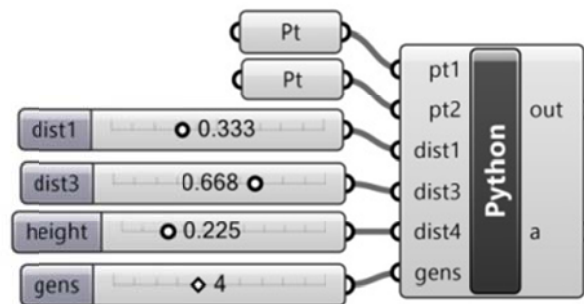
Figura 165. Variações da curva de Peano.



Fonte: Do autor, 2016.

### Código Grasshopper (Figura 166)

Figura 166. Componente Python da curva de Peano.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura inicial: reta

Pt1= Ponto inicial

Pt2= Ponto final

Iteração= Dividir a reta em três segmentos iguais, girar os segmentos para formar a figura inicial.

Dist1= cria o segundo ponto da reta

Dist3= cria o terceiro ponto da reta

Gens= número de iterações

Código Python

```
import rhinoscriptsyntax as rs
def peano(v1,v2):
    dist= rs.Distance(v1,v2)
    p1=v2-v1
```



```

p1=rs.VectorUnitize(p1)
p1 *= dist*dist1
p1 += v1
p2=v2-v1
cross = v2-v1
cross = rs.VectorUnitize(cross)
cross= rs.VectorRotate(cross, 90, [0,0,1])
cross *= dist * dist4
p2=rs.VectorUnitize(p2)
p2 *= dist*dist1
p2 += v1 + cross
p3=v2-v1
cross = v2-v1
cross = rs.VectorUnitize(cross)
cross= rs.VectorRotate(cross, 90, [0,0,1])
cross *= dist * dist4
p3=rs.VectorUnitize(p3)
p3 *= dist*dist3
p3 += v1 + cross
p4=v2-v1
cross = v2-v1
cross = rs.VectorUnitize(cross)
cross= rs.VectorRotate(cross, -90, [0,0,1])
cross *= dist * dist4
p4=rs.VectorUnitize(p4)
p4 *= dist*dist3
p4 += v1
p5=v2-v1
cross = v2-v1
cross = rs.VectorUnitize(cross)
cross= rs.VectorRotate(cross, -90, [0,0,1])
cross *= dist * dist4
p5=rs.VectorUnitize(p5)
p5 *= dist*dist1
p5 += v1
p6=v2-v1
cross = v2-v1
cross = rs.VectorUnitize(cross)
cross= rs.VectorRotate(cross, -90, [0,0,1])
cross *= dist * dist4
p6=rs.VectorUnitize(p6)
p6 *= dist*dist1
p6 += v1 + cross
p7=v2-v1
cross = v2-v1
cross = rs.VectorUnitize(cross)
cross= rs.VectorRotate(cross, -90, [0,0,1])
cross *= dist * dist4
p7=rs.VectorUnitize(p7)
p7 *= dist*dist3

```

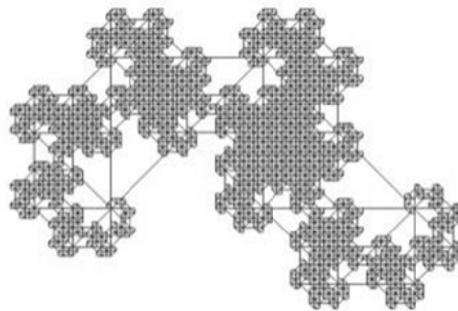
```

p7 += v1 + cross
p8=v2-v1
p8=rs.VectorUnitize(p8)
p8 *= dist*dist3
p8 += v1
return [v1,p1,p2,p3,p4,p5,p6,p7,p8,v2]
def recursive(v1,v2,gens, lineList):
    if(gens>0):
        newPts = peano(v1,v2)
l=rs.AddPolyline([newPts[0],newPts[1],newPts[2],newPts[3],newPts[4],newPts[5]
],newPts[6],newPts[7],newPts[8],newPts[9]])
        if(gens==1):
            lineList.append(l)
            recursive(newPts[0],newPts[1], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[1],newPts[2], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[2],newPts[3], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[3],newPts[4], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[4],newPts[5], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[5],newPts[6], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[6],newPts[7], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[7],newPts[8], gens-1, lineList)
            recursive(newPts[8],newPts[9], gens-1, lineList)
        return lineList
allLines=[]
a=recursive(pt1,pt2,gens,allLines)

```

### Curva Dragão (Figura 167)

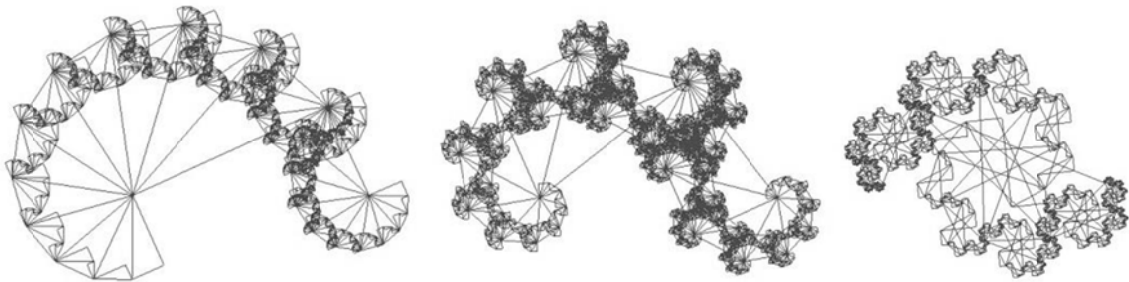
**Figura 167.** Décima iteração da curva Dragão.



Fonte: Do autor, 2016.

### Variações produzidas (Figura 168)

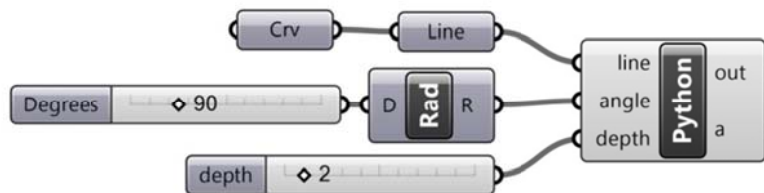
Figura 168. Três variações da curva Dragão.



Fonte: Do autor, 2016.

### Código Grasshopper (Figura 169)

Figura 169. Componente Python da curva Dragão.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura inicial: reta

Line = reta no Rhino

Iteração= Dividir a reta em dois segmentos iguais, girar os segmentos para formar a figura inicial.

Degrees= ângulo de rotação

Depth= número de iterações

### Código Python

```
import rhinoscriptsyntax as rs
import Rhino.Geometry as rg
def dragon(line, depth, resultList):
    pt1 = line.PointAt(0)
    pt2 = line.PointAt(0.5)
    pt3 = line.PointAt(1.0)
    dir = rg.Vector3d(pt2.X-pt1.X, pt2.Y-pt1.Y, pt2.Z-pt2.Z)
    dir.Rotate(angle, rg.Vector3d.ZAxis)
    pt2 += dir * 1.0
    line1 = rg.Line(pt1, pt2)
```

```
line2 = rg.Line(pt3, pt2)
resultList.append(line1)
resultList.append(line2)
if(depth>0):
    dragon(line1, depth-1, resultList)
    dragon(line2, depth-1, resultList)
a = []
dragon(line, depth, a)
```

### 8.5 Linguagem visual: Grasshopper<sup>34</sup>

As aplicações a seguir são elaboradas com o programa Grasshopper. Os resultados do primeiro experimento aqui descritos encontram-se publicados em maior detalhe em Sedrez, Meneghel, Celani (2013).

Inicia-se pesquisando se havia um exemplo do triângulo de Sierpinski criado anteriormente, pois os arquivos Grasshopper são frequentemente compartilhados entre usuários. Encontrou-se um exemplo no fórum do Grasshopper, mas não foi possível reproduzi-lo, pois utilizava componentes de versões anteriores.

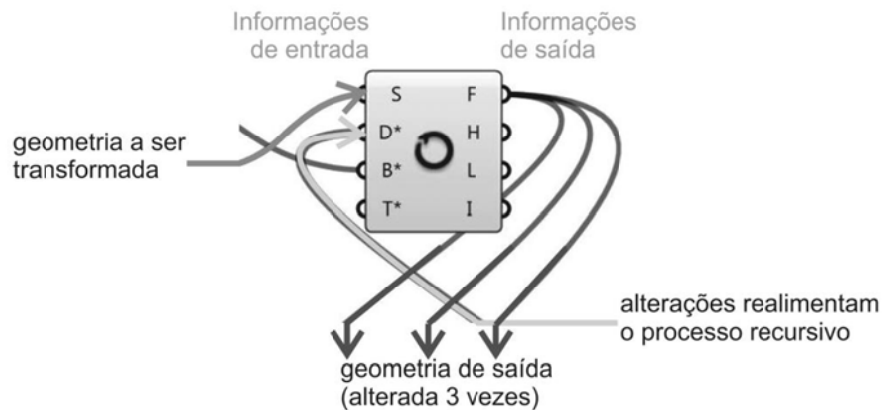
Na etapa 1, a ideia é encontrar os pontos médios de cada lado do triângulo para uni-los, usando o componente *Div. Length* para dividir as linhas do polígono em partes iguais. Essa solução não avançou, uma vez que o Grasshopper utiliza a mediana geométrica como referência do componente polígono.

Na etapa 2, reinicia-se o exercício criando os 3 pontos (0,0, lado, 0 e altura, lado/2) utilizando *sliders* para permitir ao usuário alterar os lados do triângulo equilátero. Os pontos assim definidos são unidos por linhas e transformados em um plano para em seguida sofrerem uma transformação em escala três vezes a partir dos três vértices definidos anteriormente. Então, esses triângulos são escalados mais nove vezes e depois vinte e sete vezes, por meio de um procedimento puramente mecânico, que atuava sobre as superfícies, e não sobre as linhas.

Como o Grasshopper não possui componentes para implementar a recursão, buscou-se um *add-on* que permitisse incluir esse tipo de procedimento no código. Então, estudou-se o Hoopsnake, que repete um procedimento a partir de um número definido de iterações. O que ele faz é criar uma cópia do dado recebido do usuário e armazenar esse dado localmente. Esse dado duplicado é disponibilizado por meio de um parâmetro de saída padrão do Grasshopper (**Figura 170**). No lado esquerdo o componente tem as entradas 'S' (dados de entrada) onde se conecta a geometria inicial, 'D' (coleção de dados genéricos) onde se conecta a geometria após a transformação que o usuário deseja aplicar, 'B' (condicionante de finalização) onde se informa o número máximo de iterações, 'T' (gatilho) controle de alguma transformação que dispara quando necessário. No lado direito o componente tem as saídas 'F' (*feedback*) onde o Hoopsnake emite uma cópia do que entra em 'S' ou 'D', 'H' (histórico) informações sobre as iterações, 'L' e 'I' que são contadores de *loops* e iterações respectivamente.

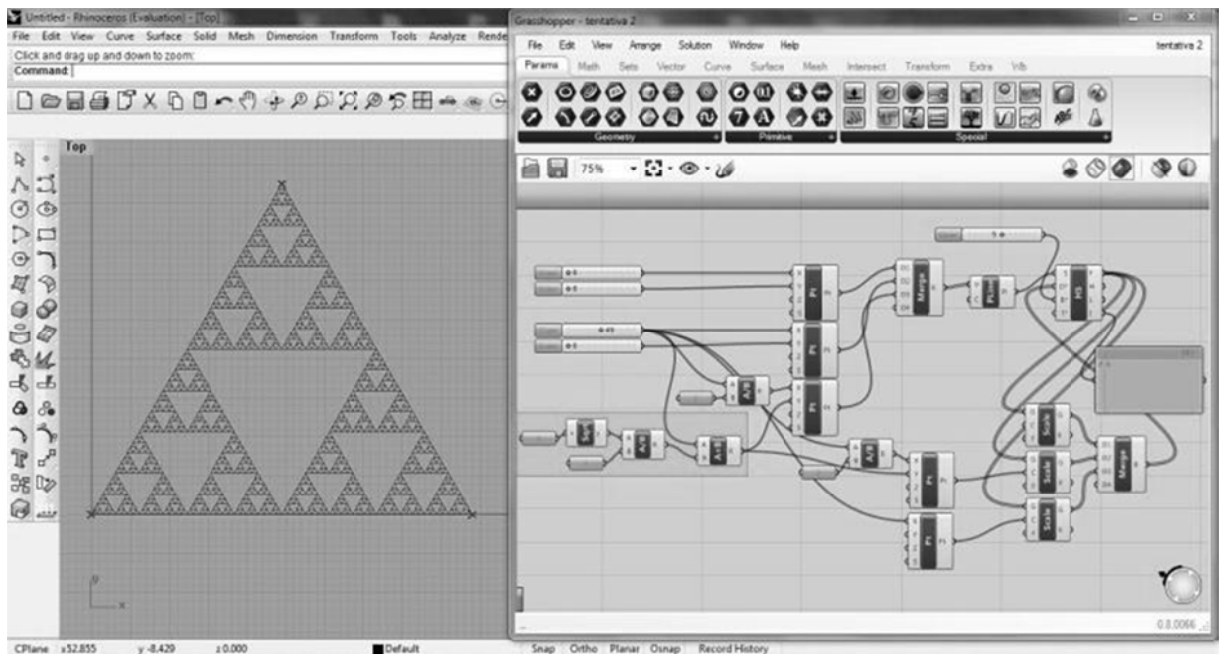
---

<sup>34</sup> Publicado em SBQP TIC - Sedrez, Meneghel, Celani (2013).

**Figura 170.** Componente Hoopsnake.

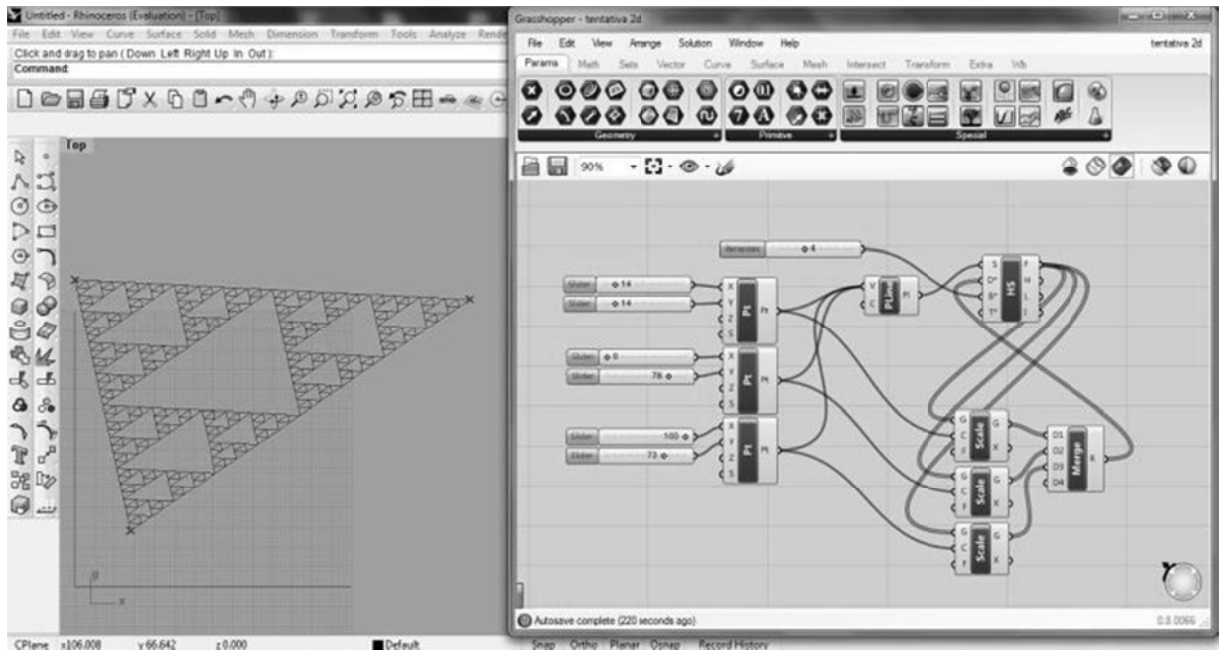
Fonte: Sedrez, Meneghel, Celani, 2013.

Percebe-se que é possível aplicar a transformação de escala pelos vértices do triângulo inicial, resultando no Sierpinski para o triângulo equilátero, processo apresentado na **Figura 171**. Em seguida, altera-se a composição para produzir o fractal Sierpinski em qualquer triângulo, como mostra o exemplo na **Figura 172**, onde são eliminados os componentes desnecessários. Durante a realização de testes finais nota-se que é possível fazer a iteração para um objeto geométrico com mais que três lados com iterações autossimilares (**Figura 173**).

**Figura 171.** Objeto com 5 iterações.

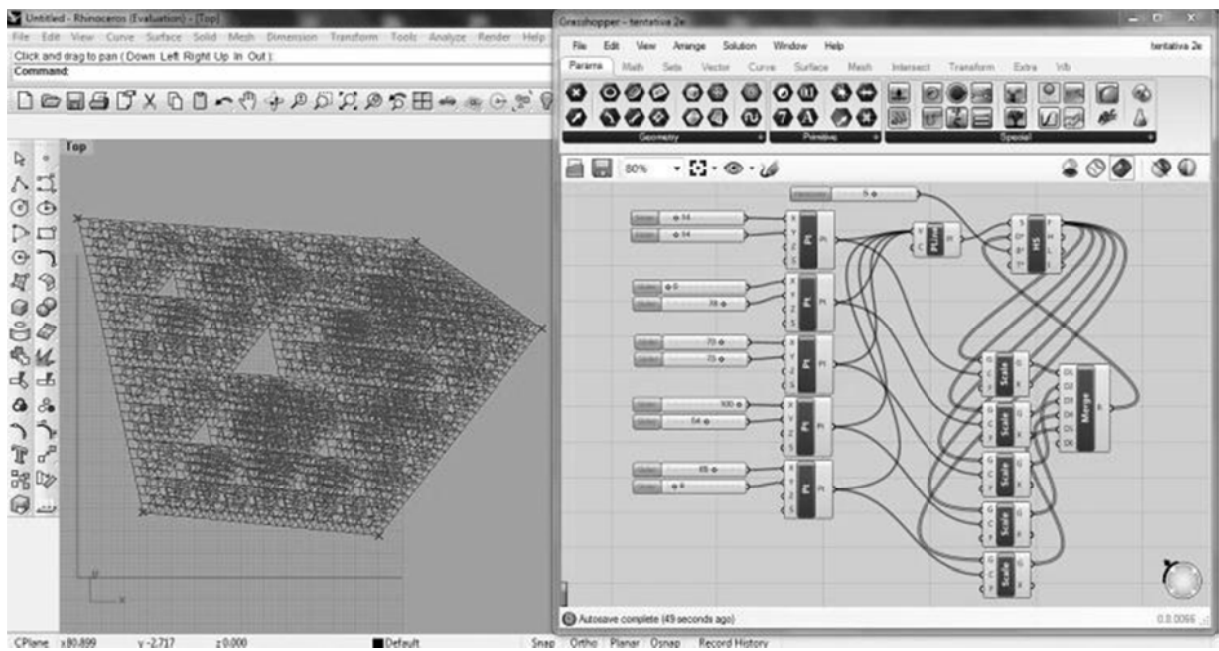
Fonte: Sedrez, Meneghel, Celani, 2013.

Figura 172. Objeto com o código aperfeiçoado.



Fonte: Sedrez, Meneghel, Celani, 2013.

Figura 173. Objeto construído com 5 lados.



Fonte: Sedrez, Meneghel, Celani, 2013.

Os fractais a seguir são criados usando Grasshopper e Hoopsnake.

### Triângulo de Sierpinski

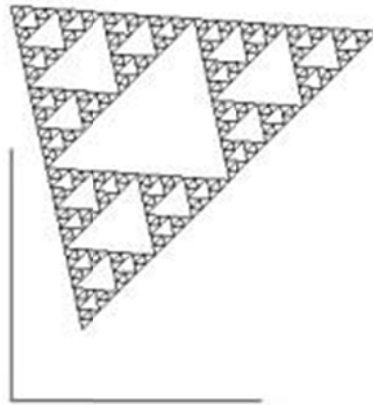
Definir 3 pontos quaisquer;

conectar os pontos com uma polilinha;

aplicar o comando escala na figura três vezes, uma vez para cada vértice;

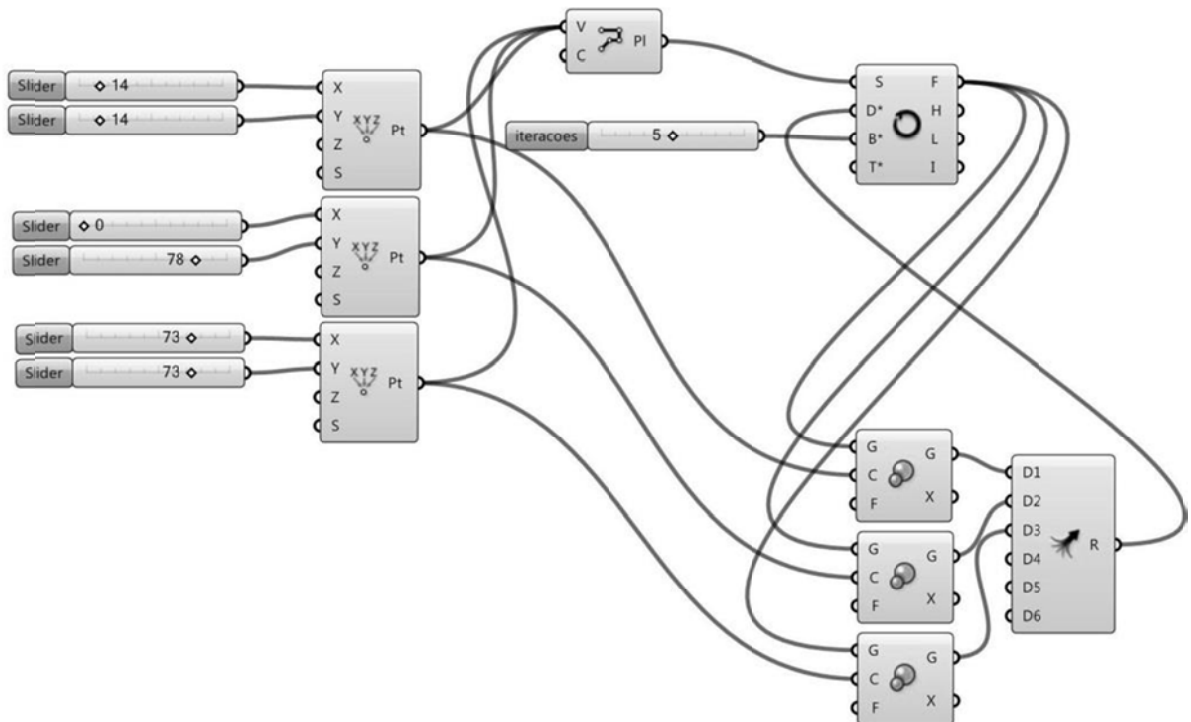
iterar 5 vezes (Figura 174, Figura 175).

**Figura 174.** Triângulo de Sierpinski gerado.



Fonte: Do autor, 2016.

**Figura 175.** Código Grasshopper para o Triângulo de Sierpinski.



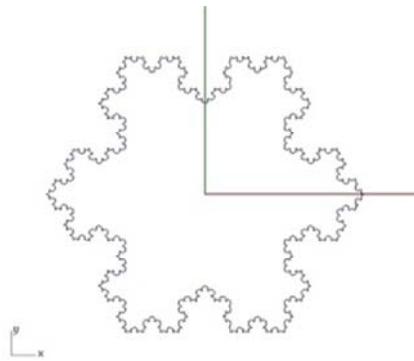
Fonte: Do autor, 2016.



## Ilha de Koch

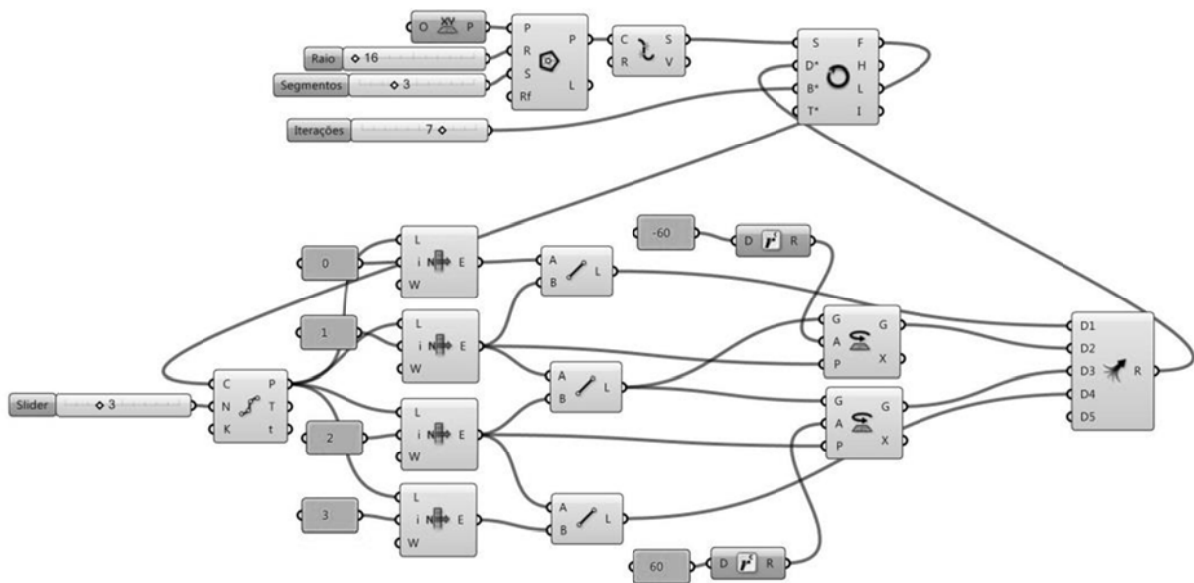
Definir um polígono com 3 lados e separar o lados;  
 dividir cada lado em 3 partes iguais;  
 seleccionar os pontos 0, 1, 2 e 3;  
 criar 3 retas conectando os pontos, sendo que a reta central deve sofrer rotação duas vezes;  
 iterar 7 vezes (Figura 176, Figura 177).

Figura 176. Ilha de Koch gerado.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura 177. Código da Ilha de Koch.

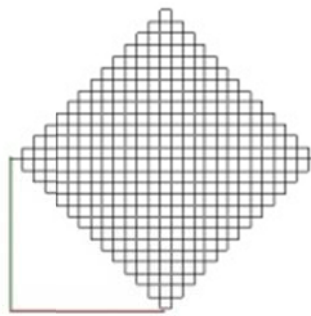


Fonte: Do autor, 2016.

### Curva de Peano

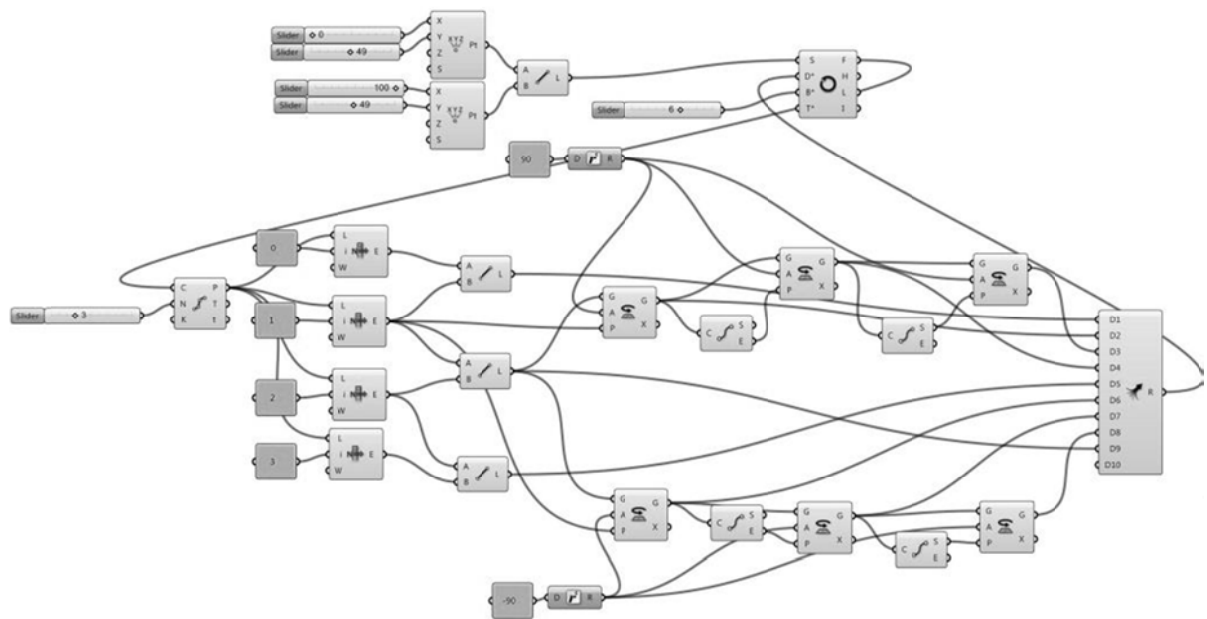
- Definir dois pontos quaisquer e construir 1 linha;
- dividir a linha em 3 partes iguais;
- selecionar os pontos 0, 1, 2 e 3;
- criar 3 retas conectando os pontos;
- aplicar as transformações necessárias;
- iterar 6 vezes. (Figura 178, Figura 179)

Figura 178. Curva de Peano gerada.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura 179. Código da curva de Peano.



Fonte: Do autor, 2016.

### Curva de Minkowski

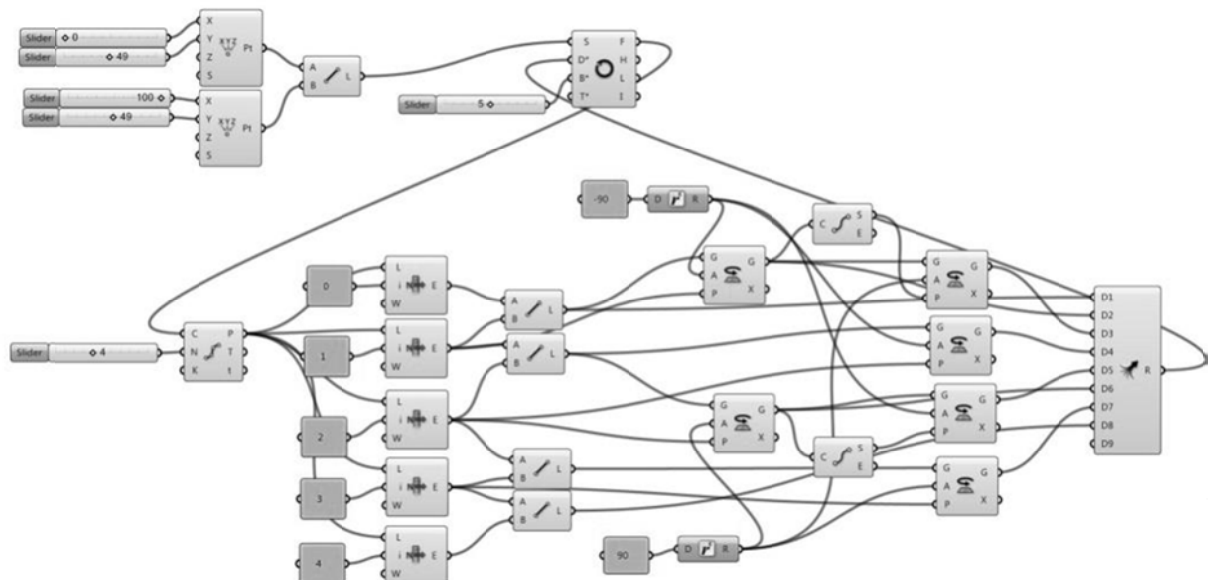
Definir dois pontos quaisquer e construir 1 linha;  
 dividir a linha em 4 partes iguais;  
 seleccionar os pontos 0, 1, 2, 3 e 4;  
 criar 4 retas conectando os pontos;  
 aplicar as transformações necessárias;  
 iterar 6 vezes. (Figura 180, Figura 181)

Figura 180. Curva de Minkowski gerada.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura 181. Código da curva de Minkowski.



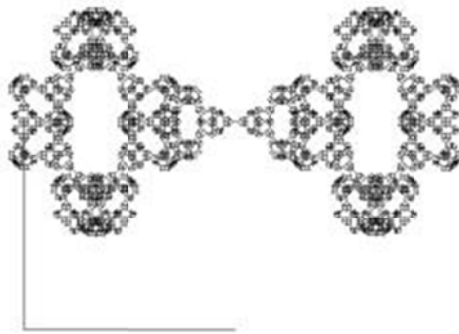
Fonte: Do autor, 2016.

### Curva fractal criada pelo autor

Definir dois pontos quaisquer e construir 1 linha;  
 dividir a linha em 3 partes iguais;  
 seleccionar os pontos 0, 1, 2, e 3;  
 criar 3 retas conectando os pontos;  
 aplicar as transformações rotacionando as retas 1 e 3 em  $45^\circ$  em diferentes pontos da reta.

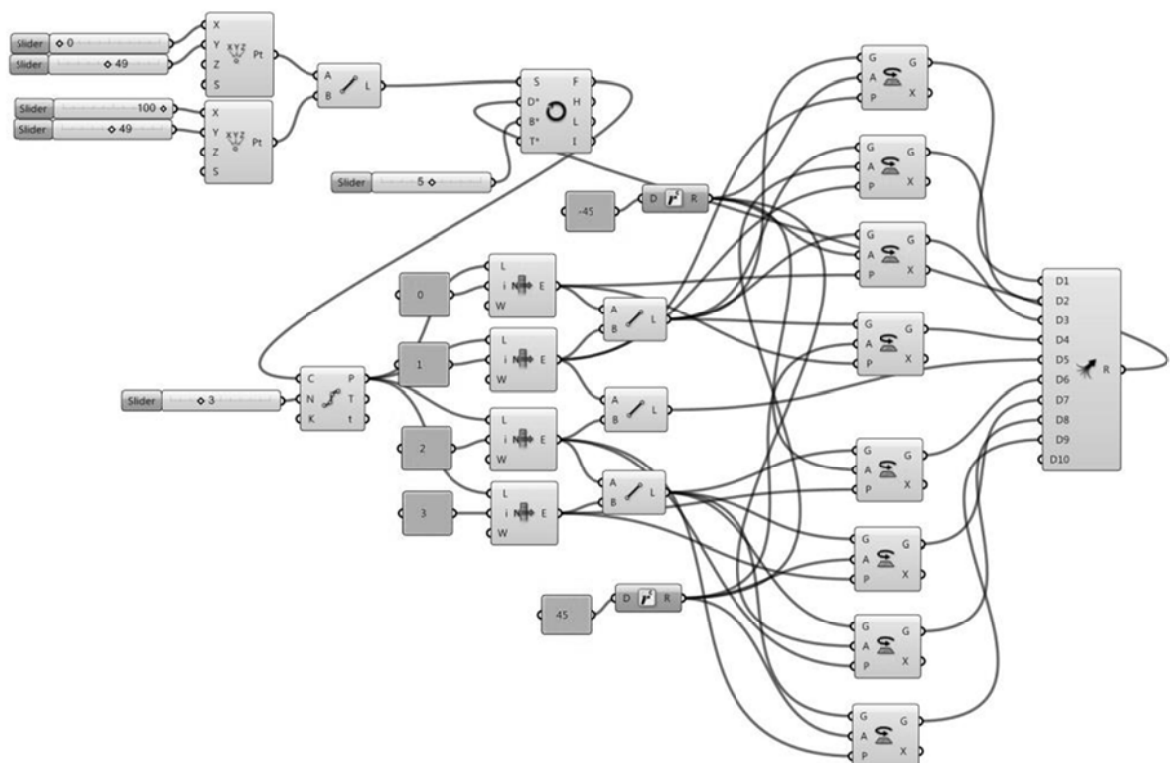
iterar 5 vezes (Figura 182, Figura 183).

Figura 182. Curva fractal gerada pelo autor.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura 183. Código da curva gerada pelo autor.



Fonte: Do autor, 2016.

## 8.6 Aplicações em projeto

Nesta seção seis aplicações de fractais em projeto são descritas.

Duas aplicações são para **projetos novos**, sendo voltada uma para o ensino (seção 8.6.1) e uma para o projeto de um brise-soleil (seção 8.6.2). Nesses exercícios de projeto o autor se propõe a elaborar projetos usando como método generativo a geometria fractal.

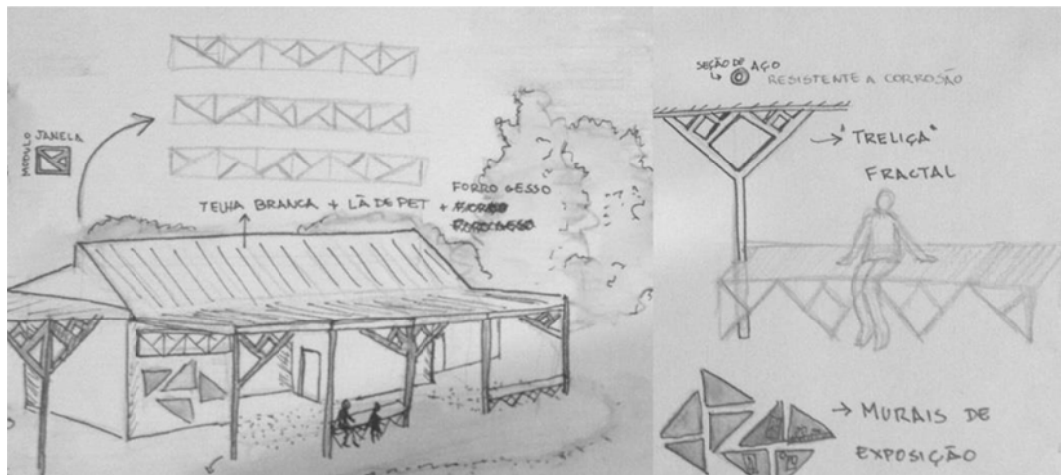
Duas aplicações para a geração de fractais para **projetos existentes** são elaboradas: uma para o Auditório Saint-Cyprien (seção 8.6.3) e outra para o Grand Egyptian Museum (seção 8.6.4). São dois projetos onde a partir da revisão da literatura foi possível identificar o processo generativo e reproduzir as regras diretamente.

Por fim, são analisadas duas aplicações para projetos existentes, cuja programação é de maior complexidade e ao mesmo tempo os arquitetos não usaram de automação no processo generativo. O projeto do museu de ciências da Unicamp no qual os arquitetos empregaram a GF em um processo manual (seção 8.6.5). O foco foi elaborar a programação para simular o processo generativo de projeto computacionalmente fazendo uma **análise** comparativa do processo e do resultado. E por fim, o projeto para o bairro de Dakar, Diarniadio (seção 8.6.6), que ao utilizar conceitos da cultura islâmica cria uma progressão em escalas sem que os arquitetos empregassem a GF de maneira consciente. Neste caso, a análise do projeto existente busca uma **inovação** ao apresentar uma solução que segue os princípios gerais do projeto original, mas incorpora parâmetros para gerar alternativas.

### 8.6.1 Projeto novo: Ensino de Projeto

Este exercício foi desenvolvido em conjunto com alunas de graduação em arquitetura da Unicamp. O projeto consiste em criar um elemento construtivo paramétrico para o edifício que desenvolviam em paralelo para a disciplina projeto arquitetônico, no caso uma escola (Figura 184).

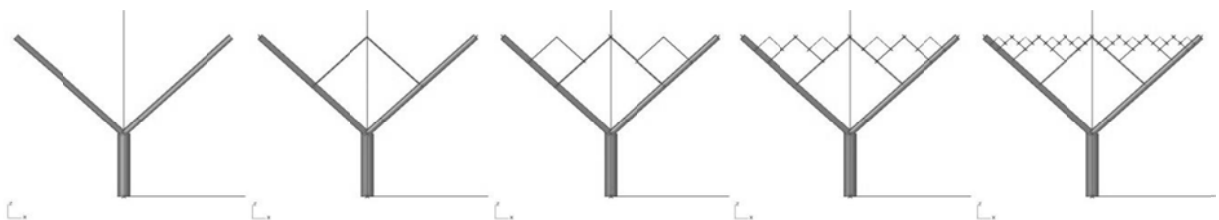
**Figura 184.** Croqui elaborado pelas alunas para a proposta de coluna fractal.



Fonte: Maia, Mascia, 2014.

As alunas optaram por elaborar uma coluna para os pátios externos com uma estética de ramificação, com características de um L-system, contudo com a altura total constante (Figura 185). A mesma estética seria adotada em outros elementos construtivos como as esquadrias.

**Figura 185.** Geração da coluna.

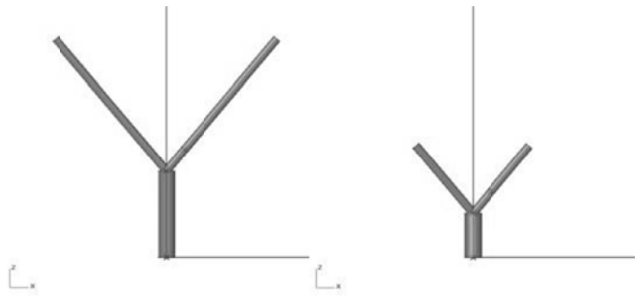


Fuste com 39% da altura, ângulo de abertura de 42° e início do ramo em 50%.

Fonte: Do autor, 2016.

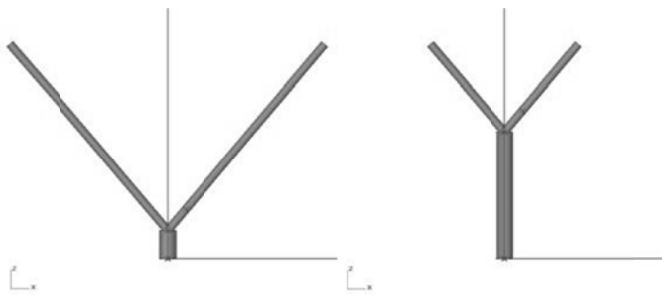
Trabalhando em conjunto com as alunas, foi definida a implementação de um código paramétrico, focando nas seguintes questões: limitação da altura total (paralela ao solo) (Figura 186), variação da proporção entre o fuste e os ramos da coluna (Figura 187), variação do ângulo de abertura dos dois ramos iniciais (Figura 188), variação no diâmetro dos tubos (Figura 189), variação na localização dos ramos seguintes (Figura 190) e finalmente na iteração da geometria utilizando o Hoopsnake, de maneira que alternativas estruturais e estéticas pudessem ser analisadas no projeto.

**Figura 186.** Variação na altura da coluna.



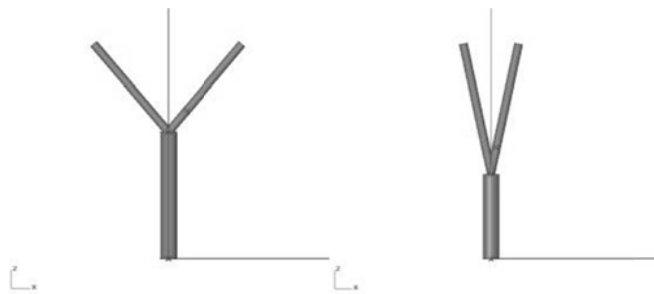
Fonte: Do autor, 2016.

**Figura 187.** Variação na proporção do fuste.



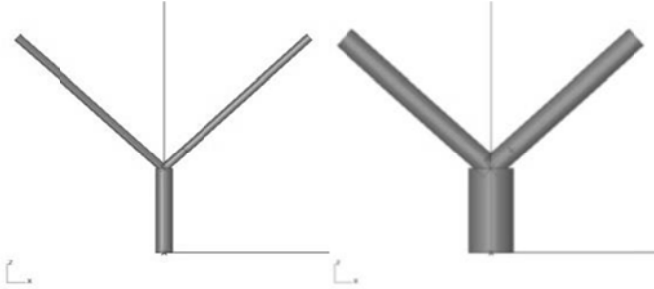
Fonte: Do autor, 2016.

**Figura 188.** Variação no ângulo de abertura dos ramos.

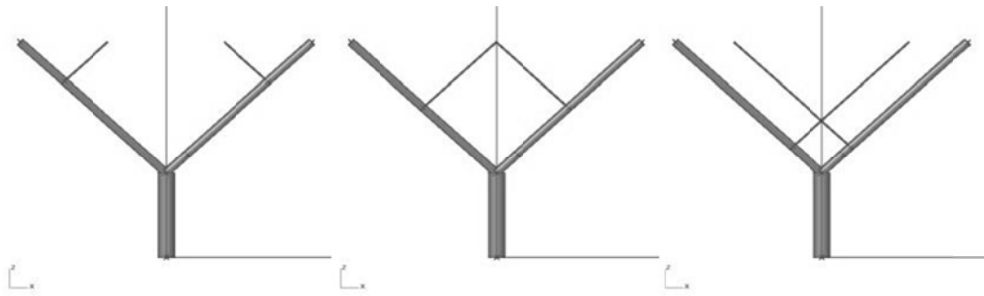


Fonte: Do autor, 2016.

**Figura 189.** Variação do diâmetro dos tubos.

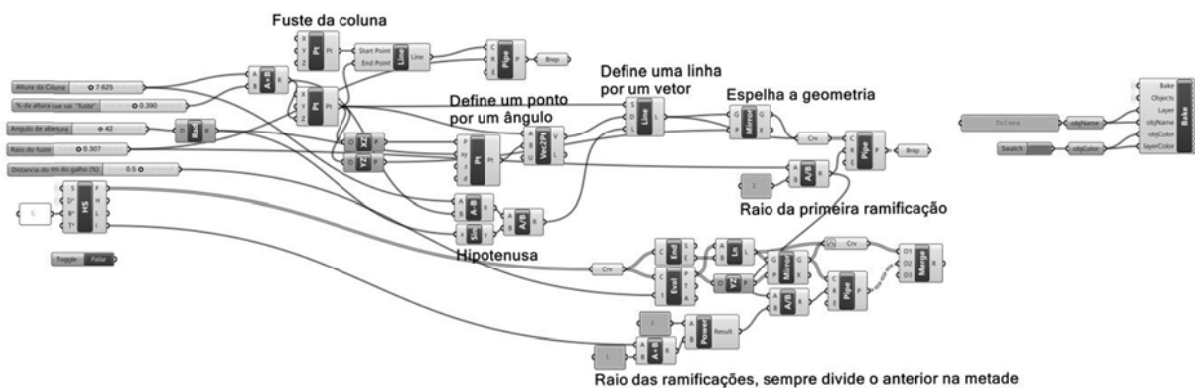


Fonte: Do autor, 2016.

**Figura 190.** Variação na posição dos ramos.

Fonte: Do autor, 2016.

De simples solução, a parametrização deste elemento construtivo demandou dos envolvidos conhecimentos matemáticos como geometria e trigonometria e especificamente fractais. O código implementado no Grasshopper (**Figura 191**) é relativamente curto e foi elaborado com ajuste dos parâmetros que possibilitam o ajuste de cada uma das questões já citadas.

**Figura 191.** Código Grasshopper colunas.

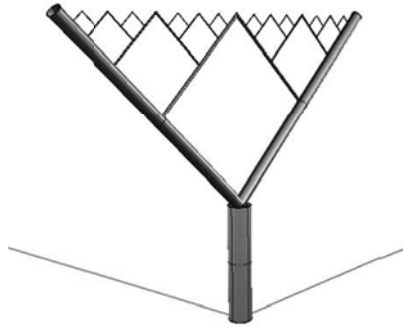
Algumas ligações entre componentes estão ocultas.

Fonte: Do autor, 2016.

Apesar de o exercício ter finalizado neste nível (**Figura 192**), questões como material, análise estrutural, fabricação e detalhamento construtivo poderiam dar sequência a um conjunto de conhecimentos fundamentais para alunos de arquitetura imersos no projeto computacional.



**Figura 192.** Renderização de uma das alternativas.



Fonte: Do autor, 2016.

### 8.6.2 Projeto novo: Projeto de Fachada

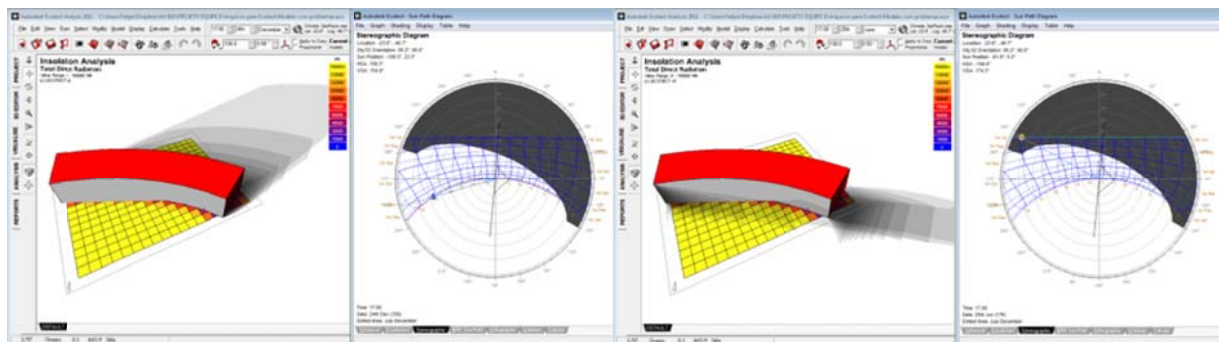
Este exercício foi realizado durante a disciplina Prototipagem e Fabricação Digital, e consiste no projeto de uma proteção solar para a fachada do edifício CB3 da Unicamp. Os resultados do experimento aqui descritos encontram-se publicados em maior detalhe em Sedrez, Meneghel (2013).

As formas do edifício foram elaboradas pelo escritório Modelo da Unicamp atendendo ao plano de expansão da universidade e seguem a geometria curva presente nos edifícios do ciclo básico. Notou-se que o controle da insolação deveria ser estudado com atenção e que qualquer solução para a proteção solar deveria permitir a ventilação de maneira eficiente. A fachada curva do edifício voltada para posição sudoeste criou áreas de menor incidência solar e outras com maior necessidade de proteção conforme a estação do ano. Essa primeira constatação evidenciou que uma proteção solar uniforme na fachada inteira não atenderia com eficiência a variação da insolação.

O partido arquitetônico baseou-se em estudos de caso e referências de proteção de fachadas como o muxarabi<sup>35</sup>. Buscou-se criar uma trama que atendesse aos critérios ambientais previamente estudados. O muxarabi é frequentemente construído com uma trama regular, mas decidiu-se utilizar um padrão fractal recursivo que permitisse variações irregulares no desenho. Considerou-se que os elementos da fachada seriam produzidos com técnicas de fabricação digital. O primeiro passo foi estabelecer um modelo paramétrico do edifício para a elaboração das análises.

Tomando o modelo virtual simplificado como base, foram feitas análises no Ecotect. As figuras a seguir (**Figura 193**, **Figura 194**) mostram a região sombreada e a área a ser protegida no período crítico das 17 horas no verão e inverno respectivamente. No inverno pode-se observar a diagonal de sombra gerada pelo próprio edifício.

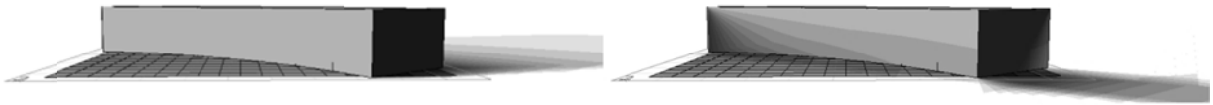
**Figura 193.** Simulação de insolação: inverno 17:00 e verão 17:00.



Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

<sup>35</sup>Muxarabiê ou Muxarabi: Tipo de proteção para janelas originária da arquitetura árabe geralmente construída com uma treliça de madeira.

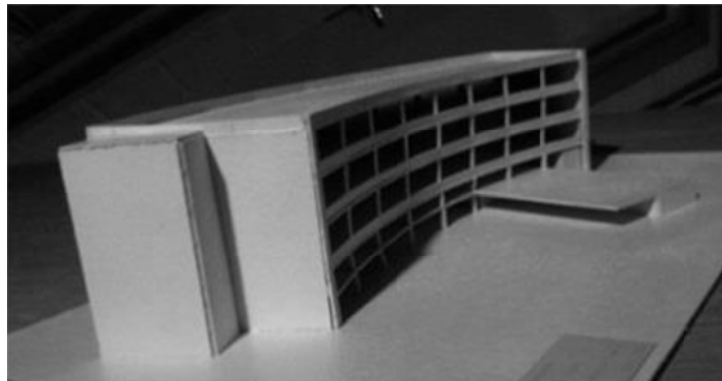
**Figura 194.** Simulação de insolação: junho e dezembro.



Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

O modelo virtual e os arquivos gerais do projeto foram planejados para a produção de desenhos para corte a laser e a elaboração do modelo físico em papel Paraná. O modelo físico pôde ser analisado no Heliodon mostrando uma pequena variação em relação às análises numéricas (**Figura 195**).

**Figura 195.** Análise no Heliodon: verão 17:00.



Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

Concluídas as análises de insolação e a construção do modelo, se discutiu a proposta para a fachada. A ideia inicial foi a de divisão da fachada em módulos definidos pelos andares e pilares, e também a criação de uma fragmentação na fachada (**Figura 196**). Com iterações recursivas seria possível dividir em partes menores as áreas em que houvesse maior incidência solar. Para tanto a GF se mostrou útil, pois permitiu controlar as iterações de elementos em diferentes escalas, criando um padrão autossimilar. A variação obtida foi associada a áreas com maior ou menor necessidade de luz.

**Figura 196.** Croqui inicial.



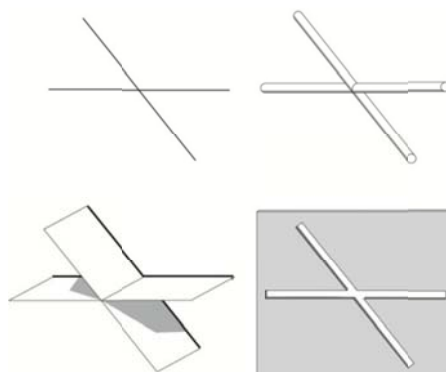
Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

Iniciou-se então a criação de um fractal parametrizado com transformações de rotação e de escala das formas. Os parâmetros originários do modelo virtual informaram pontos em um plano do Rhinoceros. Os pontos serviram como coordenadas para geração do fractal que por sua vez poderia ser associado ao modelo virtual. O processo de projeto paramétrico não é linear e algumas decisões aconteceram simultaneamente, enquanto outras antes ou após as análises. Por exemplo, a decisão de como os painéis para a fachada deveriam ser construídos surgiu em diversos momentos no processo, e ficou em um nível abstrato durante boa parte do tempo.

Quatro alternativas foram criadas e estão aqui descritas com a nomenclatura em inglês para relacioná-las aos componentes do Grasshopper: *lines*, *pipes*, *planes* e *cuts* (Figura 197). As *lines* são as formas iniciais do fractal construídas ligando pontos específicos da fachada e são iteradas a partir de parâmetros definidos por ângulos e eixos de rotação. Os *pipes* são construídos com o componente do Grasshopper de mesmo nome, criados usando as linhas como centro e um raio especificado. A extrusão das linhas em uma direção perpendicular ao plano no qual estão contidas, cria os *planes*. E, por fim, a combinação de *pipes* e um plano cria um vazado no plano no formato da seção retangular do *pipe* (Figura 197).

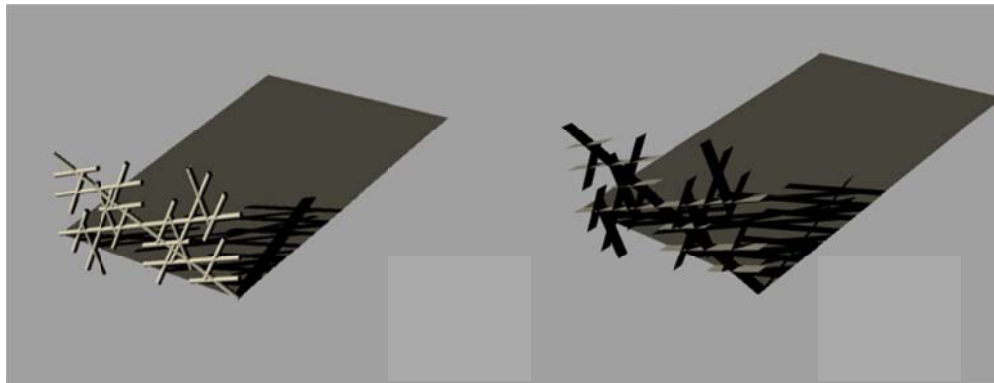
As *lines* submetidas a transformações criam padrões que foram testados e alterados. Buscou-se uma forma que seguisse a diagonal de sombra no inverno conforme o estudo de insolação. Essa região poderia ser mais aberta em relação às demais. As alternativas *planes* e *pipes* foram testadas na forma de um único painel para verificar a projeção de sombra ou luz que o padrão geraria (Figura 198). Nesses testes de sombreamento os *cuts* seriam o negativo dos *pipes*. Os *planes* poderiam funcionar como bandeja de luz, porém criaram uma dificuldade de execução. O número de peças de encaixe necessárias seria muito alto, o que aumentaria a dificuldade de montagem e o peso dos macropainéis. Outra condicionante é que nem todos os pontos da fachada poderiam receber algum tipo de fixação.

Figura 197. *Lines*, *pipes*, *planes* e *cuts*.



Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

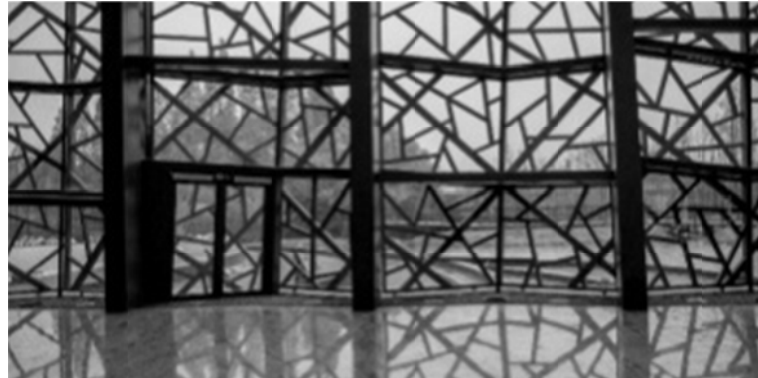
**Figura 198.** Detalhe da projeção da sombra com *pipes* e *planes*.



Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

Analisando as questões construtivas, os *planes* foram excluídos por envolver muitas peças, soldagem ou encaixes, além disso, a limpeza e manutenção seriam difíceis. Os *pipes* também foram descartados visto que necessitariam acesso a um maquinário não disponível para curvatura de tubos (calandragem) e de soldagem. O resultado com *pipes* seria similar ao projeto Wuzhen Theater de Artech Architects utilizado como referência nos estudos (**Figura 199**), neste exemplo o elemento não cumpre a função de proteção solar.

**Figura 199.** Detalhe interno da fachada do Wuzhen Theater.



Fonte: Ying, 2010.

Decidiu-se então trabalhar com os cortes dos painéis pela viabilidade de equipamentos e disponibilidade de tempo para produção do projeto e dos protótipos. A primeira proposta foi realizada com transformações específicas e controlada no Grasshopper, ao Hoopsnake foi determinado o número de iterações necessárias. Um fractal foi criado e após a execução de pequenas variações foi implementado em cada um dos 24 painéis (**Figura 200**).

Na segunda proposta um fractal único para toda a fachada se espalharia em todos os painéis, nesse caso foi necessário planificar a fachada. A transformação fractal elaborada estava apoiada em uma superfície base única, este processo não funcionaria em uma

superfície facetada ou curva. As transformações também foram alteradas para criar maior complexidade (**Figura 201**).

**Figura 200.** Variações nos 24 painéis.



Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

**Figura 201.** Um único fractal nos 24 painéis.



Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

Uma primeira característica do corte das chapas que poderia dificultar a execução seria das peças que se soltam ou se perdem devido ao cruzamento das figuras (áreas brancas maiores), além da falta de rigidez da chapa provocada pelo design. Isso foi percebido durante o processo, mas ficou muito evidente quando o modelo de proteção da fachada foi cortado a laser. Na **Figura 202** observa-se que a peça vermelha seria perdida e que os cantos laranja se tornariam frágeis. Isto foi resolvido com a execução de um detalhe que eliminasse encontros por meio da criação de uma borda. Este processo poderia ser automatizado, mas foi executado com base em decisões estéticas por isso, nesta etapa o projeto passou por uma fase de desenho manual.

**Figura 202.** Detalhe dos desenhos gerados e da edição do desenho.

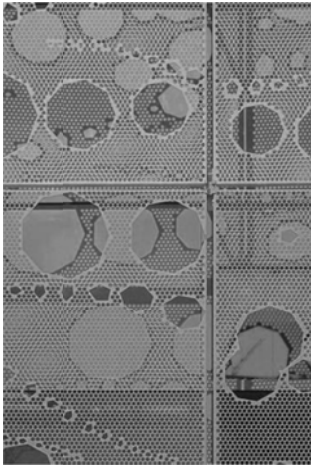


Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

A passagem de ar ainda estava limitada nas áreas mais fechadas. Então a partir de outra referência de projeto The Orange Cube de Jakob e Macfarlane (**Figura 203**), decidiu-se usar chapas perfuradas. Contudo cortar as chapas perfuradas não seria a melhor opção, testes

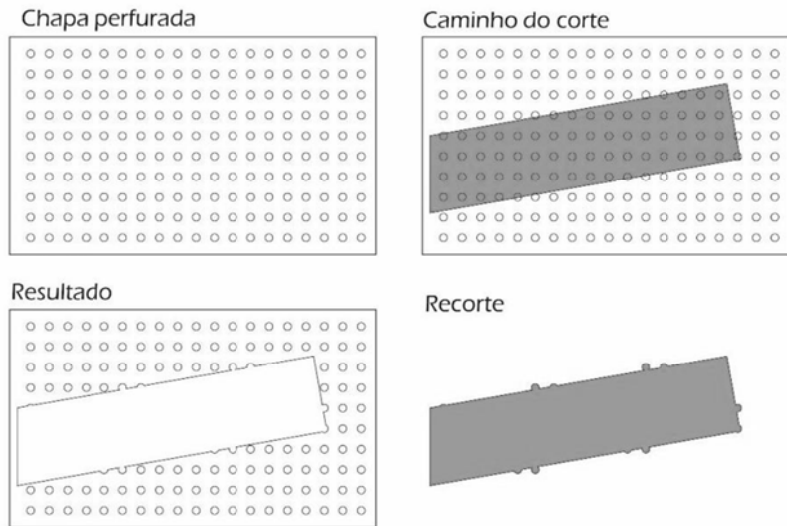
com a máquina CNC resultaram em problemas decorrentes da deformação da chapa por causa dos furos. Além disso, as figuras a serem cortadas ficariam com um desenho de bordas irregulares como apresentado na **Figura 204**.

**Figura 203.** Detalhe dos painéis do Orange Cube.



Fonte: Borel, 2011.

**Figura 204.** Detalhe do corte nas chapas perfuradas.

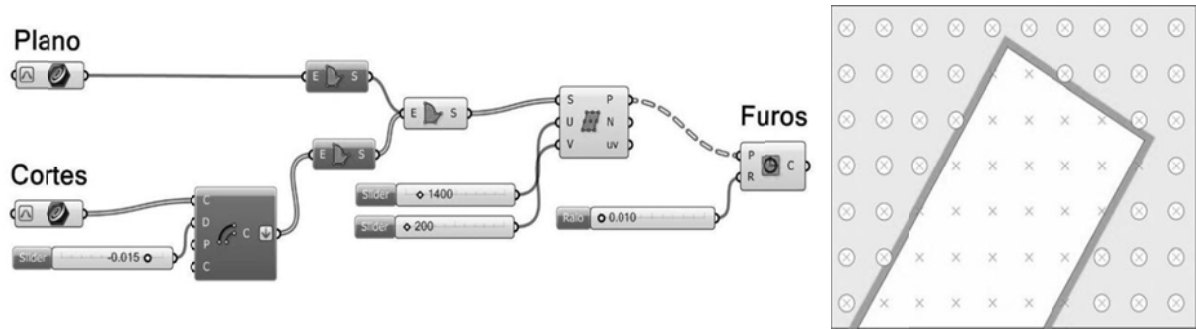


Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

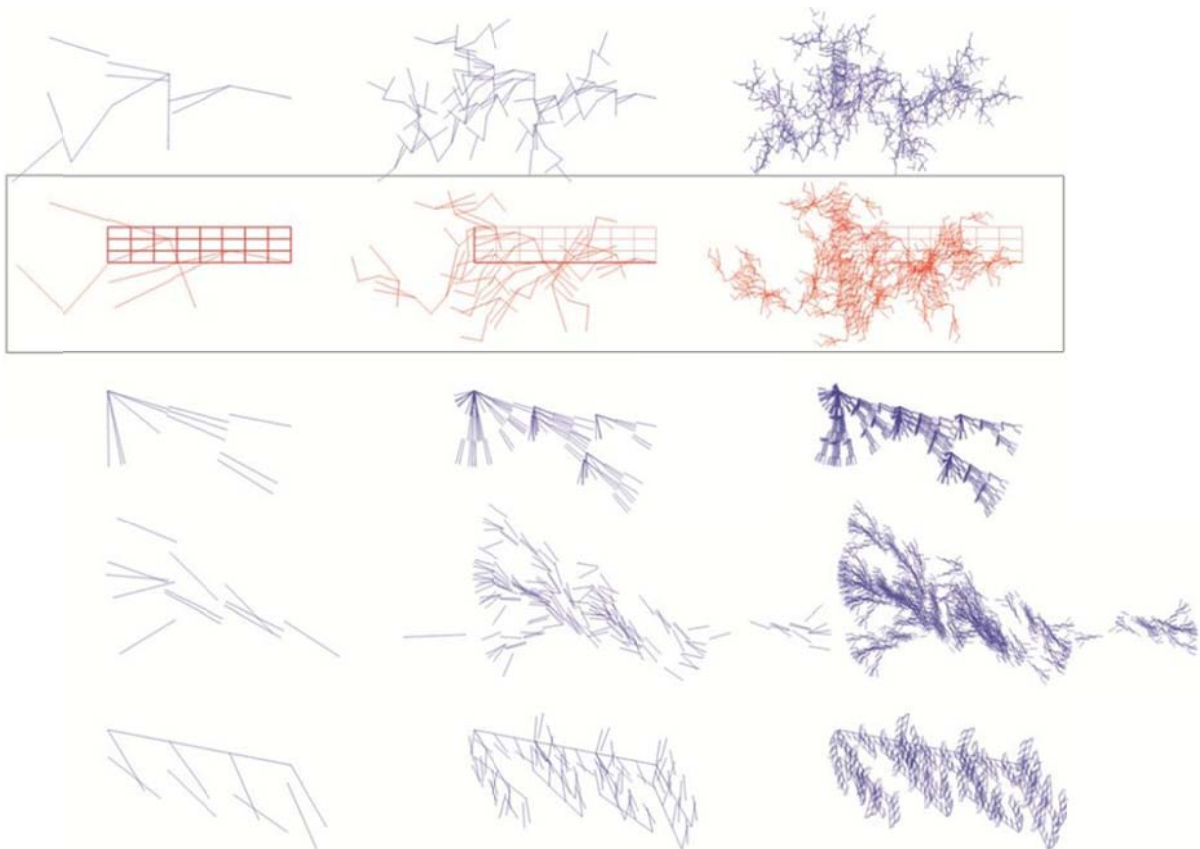
A solução encontrada foi cortar as chapas para em seguida perfura-las. Foi criado um algoritmo de perfuração que exclui os furos de áreas dentro dos *cuts* e em sua borda. Isso mantém a integridade do desenho planejado e cria resistência na borda dos vazados. Na **Figura 205** apresenta-se o código de controle da perfuração aplicado em uma parte do projeto; um *offset* controla a margem que haverá na borda excluindo os furos nesta região, *sliders* do Grasshopper controlam a quantidade de furos e a sua dimensão.

Havendo solucionado os problemas das partes “soltas”, falta de rigidez e da perfuração, foram feitas algumas simulações de variações para a fachada. Por fim optou-se por uma forma que são 11 linhas iniciais construídas sobre uma diagonal que cruza a fachada do canto superior esquerdo até o canto inferior direito. Esta diagonal coincide com a linha da sombra produzida pelo próprio edifício no inverno. No canto inferior esquerdo da fachada há menor incidência solar, portanto essa área pode concentrar mais painéis vazados. Foi selecionada a opção que aparece em destaque na **Figura 206**.



**Figura 205.** Algoritmo de perfuração e detalhe dos furos.

Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

**Figura 206.** Variações no código do fractal.

Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

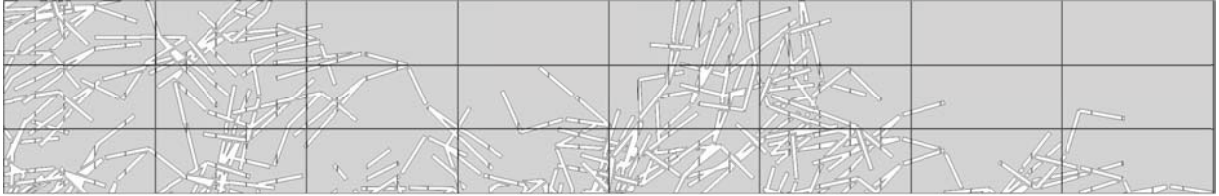
A proposta final foi desenhada (**Figura 207**), modelada (**Figura 208**) e testada novamente (**Figura 209**). Cada um dos 24 macropainéis seria dividido em 5 painéis menores posicionados verticalmente totalizando 120 peças.

A parte final da pesquisa consistiu na elaboração dos detalhes de fixação conforme a especificação de fornecedores e pesquisa de referências de detalhes arquitetônicos para fixação (**Figura 210**). Os pilares e vigas do edifício receberiam placas de fixação que apoiam montantes parafusados para o encaixe dos painéis. Os detalhes de fixação seguiram



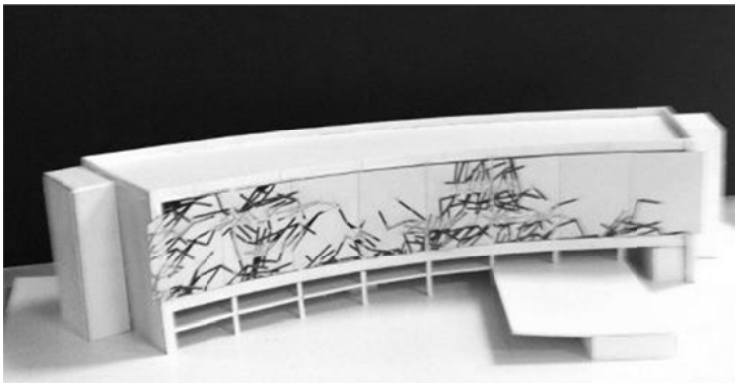
padrões geralmente utilizados, mas sofreram alterações necessárias para acomodarem os painéis e se ajustarem à curvatura do edifício.

**Figura 207.** Proposta final.



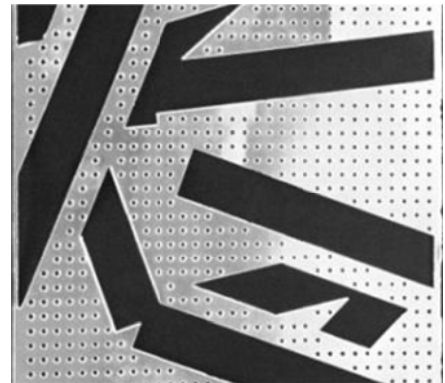
Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

**Figura 208.** Modelo físico final



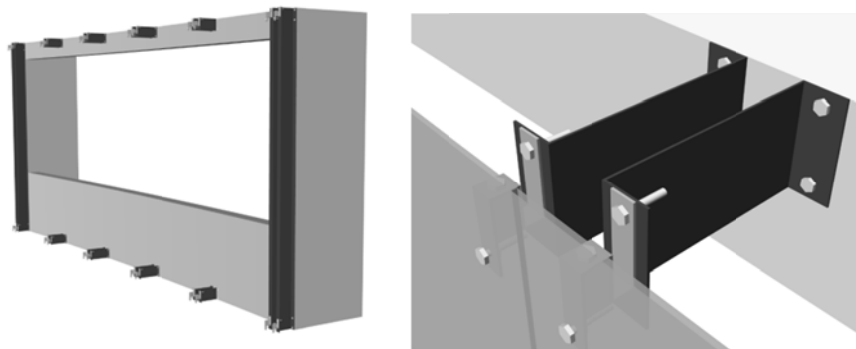
Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

**Figura 209.** Detalhe de um dos 120 painéis usinado em alumínio.



Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

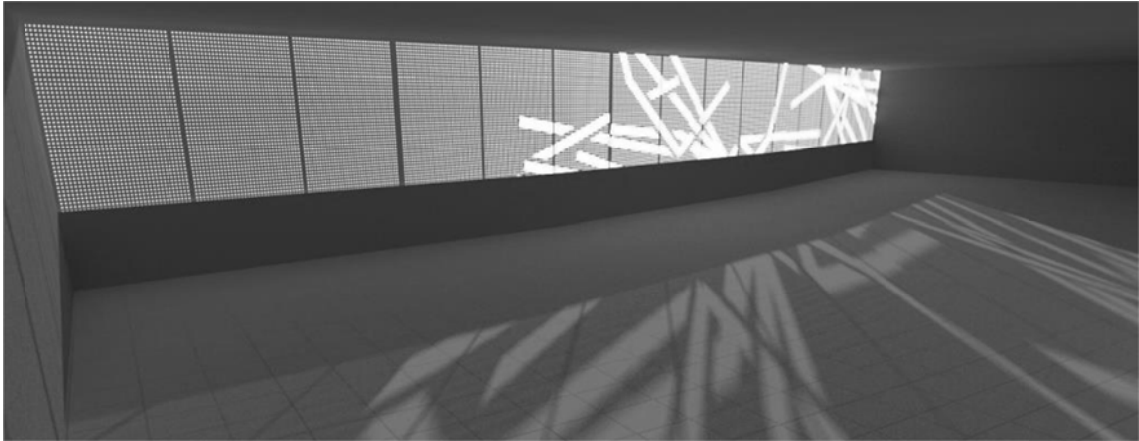
**Figura 210.** Detalhes de fixação dos painéis.



Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

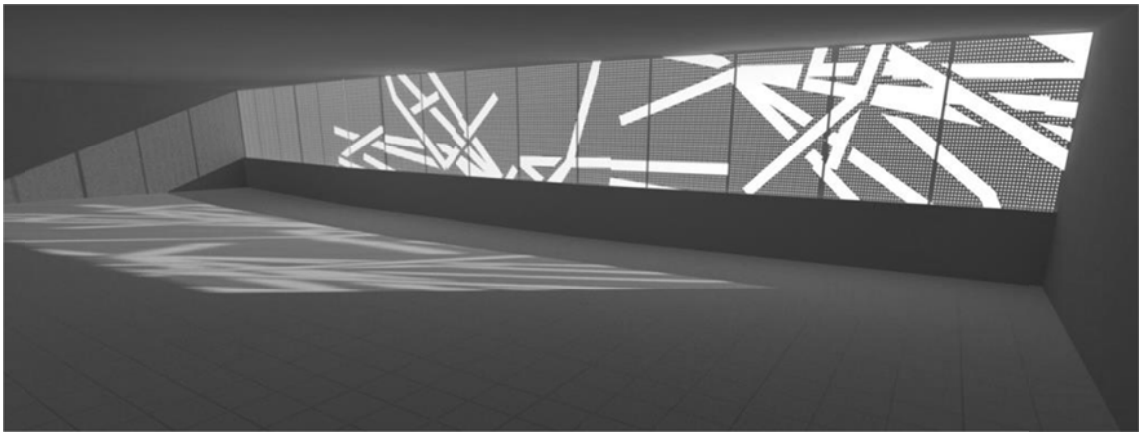
Os trabalhos foram finalizados com a realização de *renderings* (**Figura 211**, **Figura 212**) de uma das salas em diferentes períodos do ano, resultando no efeito visual desejado para o interior do prédio e também garantindo uma redução da incidência solar sem redução da iluminação. Posteriormente com a definição do tipo de esquadrias esse modelos podem ser novamente testados e alterados se necessário. Vale expor que diversos ajustes necessários no projeto só foram percebidos com a produção dos modelos, como alterações de medidas gerais, espaçamento adequado de perfuração e criação de bordas de segurança de corte.

**Figura 211.** Projeção de luz e sombra no interior: verão.



Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

**Figura 212.** Projeção de luz e sombra no interior: verão.



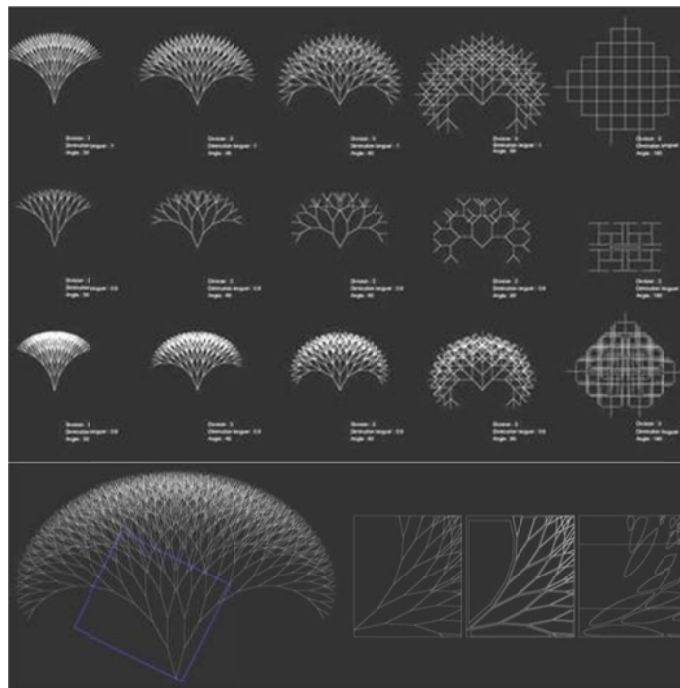
Fonte: Sedrez, Meneghel, 2013.

Os projetos a seguir são obras de arquitetos que serviram como instrumento de experimentação para esta tese.

### 8.6.3 Projeto existente: Auditório Saint-Cyprien

Este projeto utiliza um algoritmo para geração de alternativas para o desenho de uma cobertura para o auditório (**Figura 213**). A reprodução do código foi feita com Grasshopper e Rhino criando variações similares ao projeto original.

**Figura 213.** Conceito do projeto Auditório Saint-Cyprien.

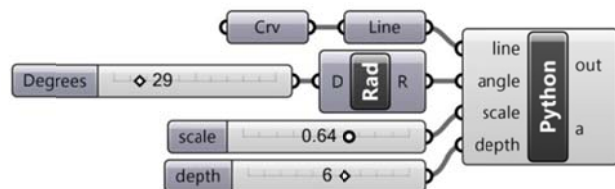


Fonte: Serero, 2007.

### Programação

#### Código Grasshopper (**Figura 214**)

**Figura 214.** Código em Python para *Fractal Tree*.



Fonte: Do autor, 2016.

#### Código Python

```
import rhinoscriptsyntax as rs
import Rhino.Geometry as rg
def recursiveLine(line, depth2, resultList):
    pt1 = line.PointAt(0)
```

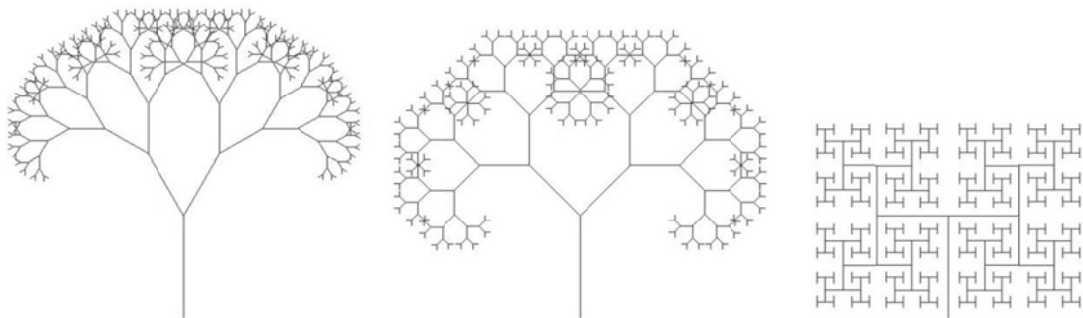
```

pt2 = line.PointAt(1)
dir1 = rg.Vector3d(pt2.X-pt1.X, pt2.Y-pt1.Y, pt2.Z-pt1.Z)
dir2 = rg.Vector3d(dir1)
dir3 = rg.Vector3d(dir2)
dir1.Rotate(angle, rg.Vector3d.ZAxis)
dir2.Rotate(angle*-1.0, rg.Vector3d.ZAxis)
dir3.Rotate(angle-angle, rg.Vector3d.ZAxis)
dir1 *= scale;
dir2 *= scale;
dir3 *= scale;
line1 = rg.Line(pt2, pt2+dir1)
line2 = rg.Line(pt2, pt2+dir2)
line3 = rg.Line(pt2, pt2+dir3)
resultList.append(line1)
resultList.append(line2)
resultList.append(line3)
if(depth2>0):
    recursiveLine(line1, depth2-1, resultList)
    recursiveLine(line2, depth2-1, resultList)
    recursiveLine(line3, depth2-1, resultList)
a = []
recursiveLine(line,depth,a)

```

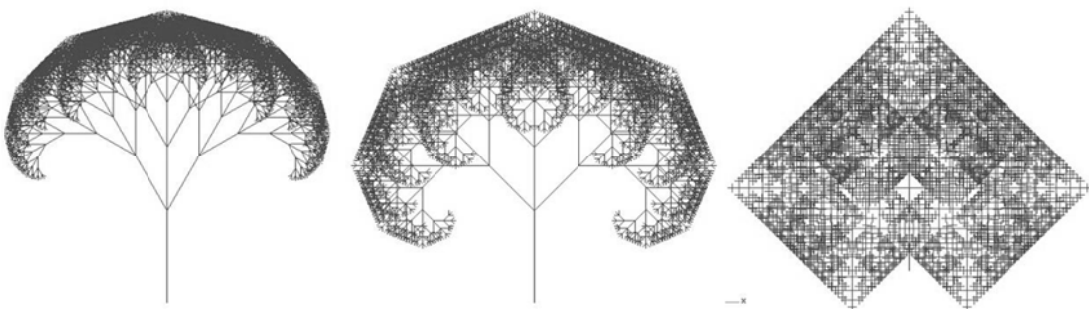
Resultado (Figura 215, Figura 216)

Figura 215. Variações com dois ramos: 30, 45 e 90 graus; sete iterações.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura 216. Variações com três ramos: 30, 45 e 90 graus; sete iterações.



Fonte: Do autor, 2016.

#### 8.6.4 Projeto existente: Grand Egyptian Museum

Neste projeto o fractal clássico triângulo de Sierpinski foi utilizado no desenho da fachada, porém em diferentes profundidades a cada iteração (**Figura 217**). Novamente o código foi reproduzido com Python e Grasshopper.

**Figura 217.** Conceito do projeto Grand Egyptian Museum.

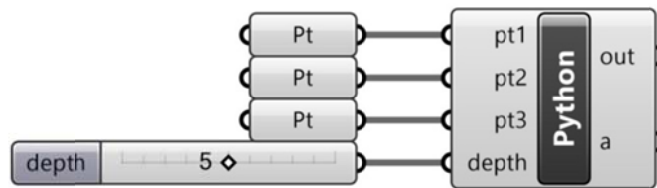


Fonte: Heneghan Peng, 2003.

#### Programação

#### Código Grasshopper (**Figura 218**)

**Figura 218.** Código em Python para Triângulo de Sierpinski.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura inicial: Triângulo (três pontos são informados: pt1, pt2, pt3)

Iteração= Dividir cada lado do triângulo em dois, unir os pontos médios formando um triângulo invertido.

Depth= número de iterações

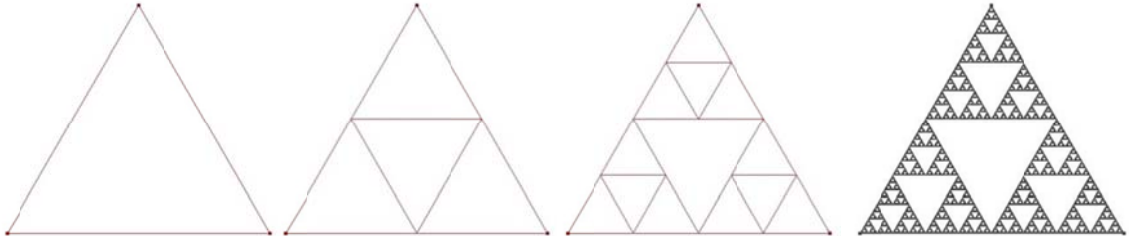
#### Código Python

```
import rhinoscriptsyntax as rs
import Rhino.Geometry as rg
import math
def sierpinski(pt1, pt2, pt3, depth, resultList):
    line = rg.Polyline([pt1,pt2,pt3,pt1])
    resultList.append(line)
    mpt1 = (pt1+pt2)/2
    mpt2 = (pt2+pt3)/2
    mpt3 = (pt3+pt1)/2
    if(depth>0):
        sierpinski(pt1,mpt1,mpt3, depth-1, resultList)
        sierpinski(pt2,mpt2,mpt1, depth-1, resultList)
        sierpinski(pt3,mpt3,mpt2, depth-1, resultList)
```

a = []  
**sierpinski**(pt1,pt2,pt3, depth, a)

Resultado (**Figura 219**)

**Figura 219.** Figura inicial, iterações 1, 2 e 7 do Triângulo de Sierpinski.

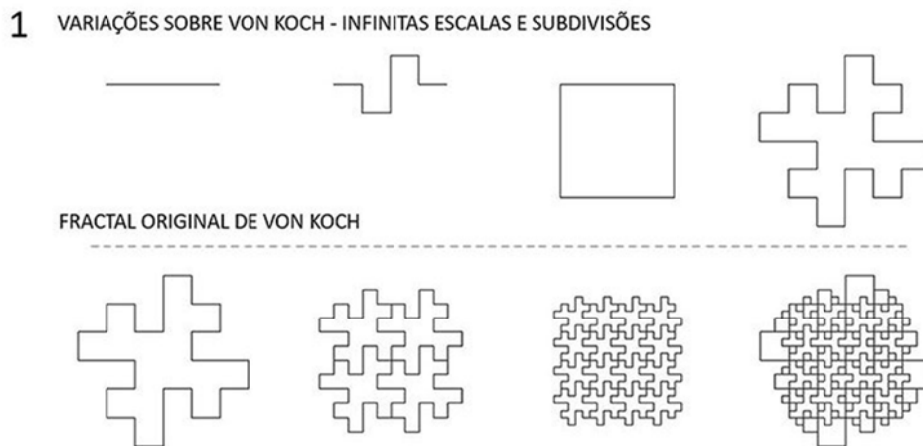


Fonte: Do autor, 2016.

## 8.6.5 Projeto existente, análise: Museum de Ciências Unicamp

Este exercício consistiu em elaborar código para gerar a fachada do Museu de Ciência da Unicamp, pois o projeto original dos arquitetos Corsi Hirano foi feito manualmente. Primeiramente é necessário observar que os arquitetos utilizaram uma curva com somente uma iteração. Eles chamam de variações sobre Von Koch (**Figura 220**), quando na realidade este objeto é a curva de Minkowski. Então, com um processo de copiar e substituir em diferentes escalas eles criam uma figura em três escalas diferentes.

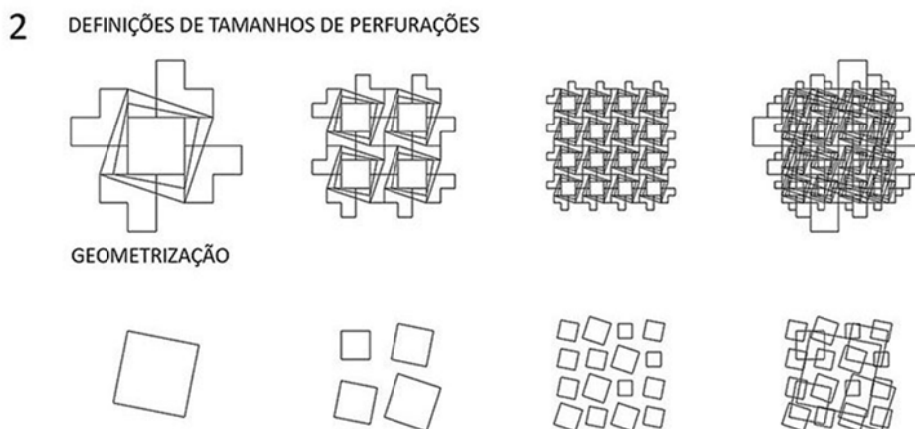
**Figura 220.** Processo generativo 1.



Fonte: Corsi Hirano, 2009.

Selecionando pontos específicos nessa figura eles criam três quadrados de tamanhos e rotações diferentes em cada uma das três escalas. Os quadrados são as perfurações propostas para os painéis das fachadas (**Figura 221**).

**Figura 221.** Processo generativo 2.

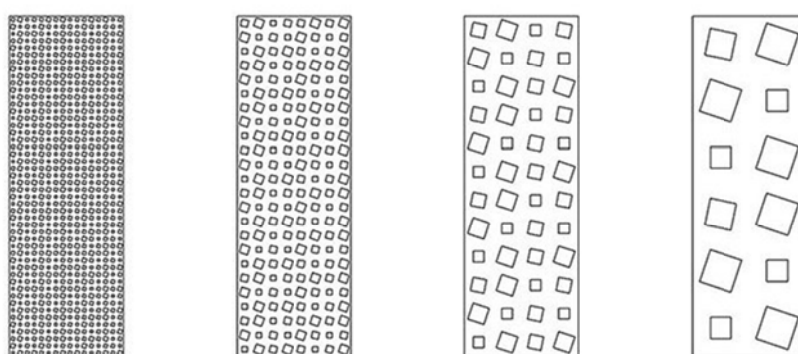


Fonte: Corsi Hirano, 2009.

Os arquitetos imaginam três painéis, cada um com os três tamanhos de quadrados, distribuídos em um *grid*. Posteriormente uma escala foi adicionada para se obter quatro painéis (Figura 222). O próximo passo foi criar entre cada painel, dois painéis intermediários com quadrados de diferentes escalas misturados (Figura 223). Todo esse processo foi feito manualmente, removendo e adicionando quadrados aleatoriamente, com o objetivo de gerar uma transição entre os painéis.

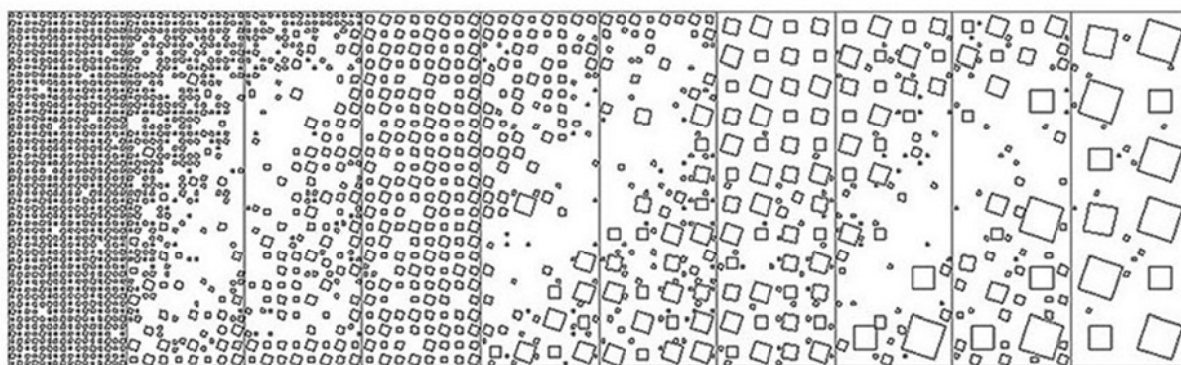
Figura 222. Quatro painéis iniciais.

### 3 DEFINIÇÕES DOS 04 MÓDULOS DE PERFURAÇÕES



Fonte: Corsi Hirano, 2009.

Figura 223. Dez painéis iniciais.



Fonte: Corsi Hirano, 2009.

A proposta dos arquitetos então foi espelhar e duplicar esses dez painéis, totalizando vinte painéis. Em seguida dispor na fachada do museu conforme os usos internos que exigem maior ou menor passagem de luz.

#### Produção do código museu de ciências.

A primeira parte foi criar o fractal curva de Minkowski (com a linha em tamanho inicial = 20 unidades). Juntar a curva conforme sugeriram os arquitetos trocando os lados de



um quadrado. Selecionar os 3 quadrados que são formados por pontos localizados no fractal. Esta parte não teve dificuldades. A implementação é de apenas uma iteração.

A segunda parte foi criar o padrão nas placas. A ideia inicial foi mover os 3 quadrados para um *grid* de pontos, mas posteriormente evoluiu para o raciocínio descrito a seguir. Primeiramente criar um plano que servirá como forma inicial e conectá-lo ao Hoopsnake. Criar um *grid*, o qual irá fornecer pontos. O *grid* inicia no plano fornecido e o tamanho é de 20 para ser equivalente ao fractal curva de Minkowski. Mover ou "alocar" os 3 quadrados com o centro nos pontos do *grid*. Neste momento ocorreram duas dificuldades: a primeira foi mover de maneira aleatória somente 1 dos 3 quadrados para cada ponto; a segunda dificuldade foi criar *attractors* que excluíssem alguns pontos do *grid*.

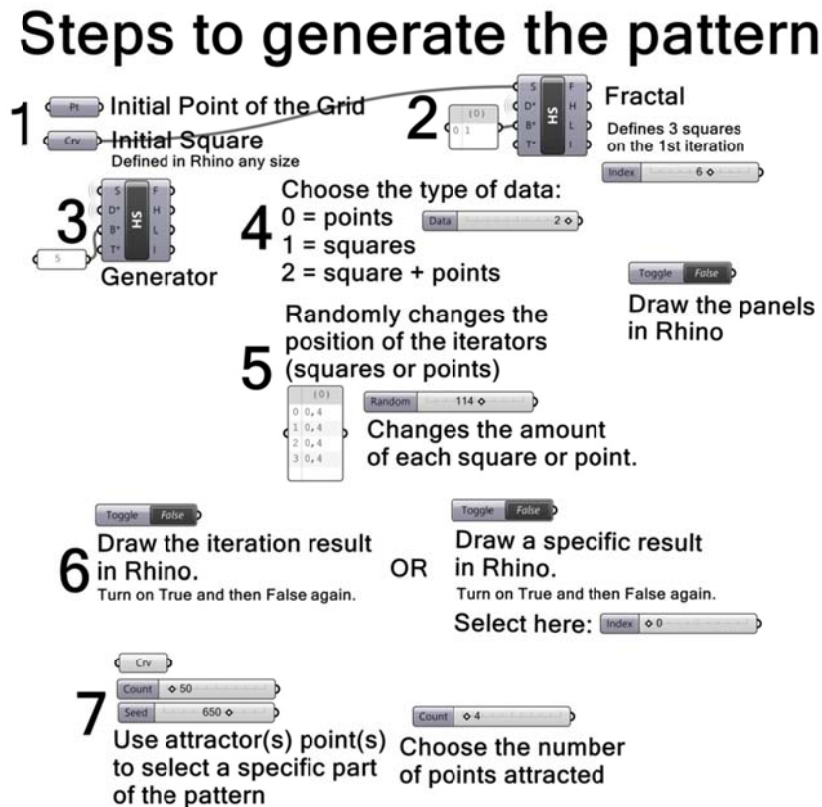
Como a figura gerada pelos arquitetos diminui de tamanho pela metade a cada iteração, foi necessário fazer o mesmo com os 3 quadrados. Então essa informação precisou ser *input* para o Hoopsnake reconhecer em qual plano será a próxima iteração. Assim foi necessário mover o plano inicial de maneira a manter o padrão de organização desejado.

A **Figura 224** mostra o código do Grasshopper com os parâmetros que podem ser alterados.

1. O usuário indica um ponto e um quadrado no Rhino.
2. Componente Hoopsnake gera o fractal curva de Minkowski que permite selecionar os vértices para os 3 quadrados iniciais.
3. Gerador, componente Hoopsnake para gerar cada iteração que consiste em distribuir, mover e escalar os quadrados nos pontos do *grid*.
4. Seleciona o tipo de dado para a iteração, se for pontos, irá gerar 4 pontos na próxima iteração, se for quadrados, a iteração irá parar e se for pontos + quadrados, ambos serão distribuídos aleatoriamente conforme o passo seguinte.
5. Move e distribui a quantidade de pontos e quadrados.
6. Desenha o resultado no Rhino (*bake*) ou desenha um quadrado ou ponto específico, caso o usuário ache necessário.
7. *Attractors* que funcionam para remover pontos do grid inicial impedindo que sejam iterados.

Por fim volta para o passo 3 para mais uma iteração.

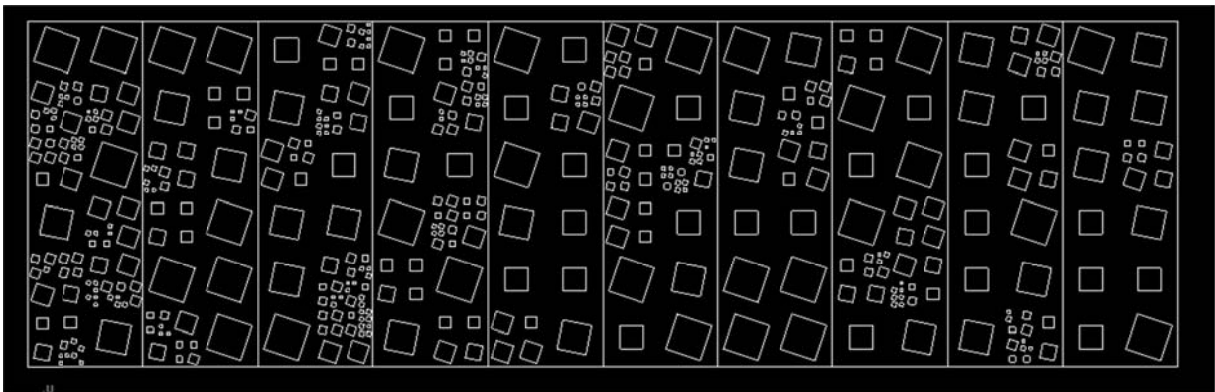
Figura 224. Passos para gerar o padrão alterando parâmetros.



Fonte: Do autor, 2016.

Caso o usuário use apenas os passos 3 a 6 o resultado a cada iteração o resultado final será similar à **Figura 225**. Percebe-se que os quadrados são distribuídos aleatoriamente e conforme os quadrados vão ficando menores se distribuem em grupos de 4. Para uma melhor compreensão do passo a passo ver o vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=qDA0yWEFVuk> no qual é possível perceber as possibilidades de criar diferentes padrões alterando os quadrados iniciais.

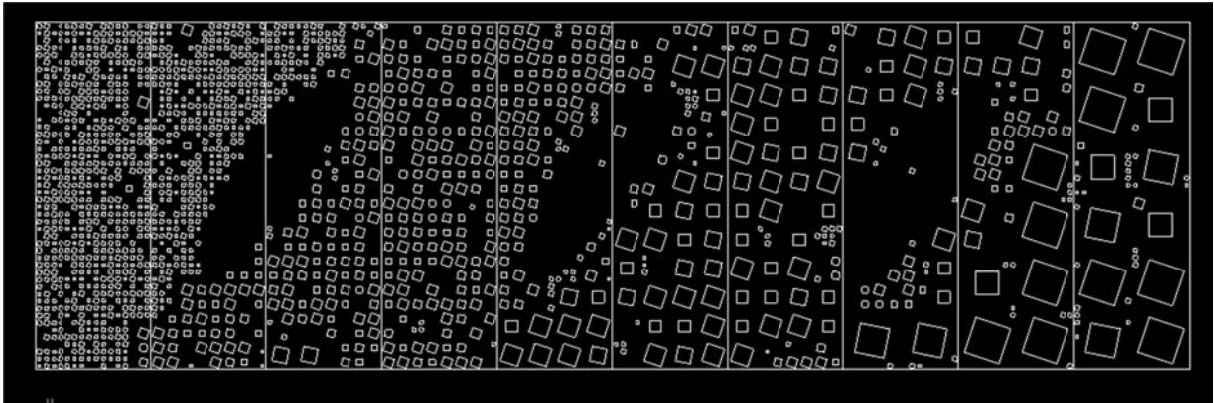
Figura 225. Painéis gerados com iterações.



Fonte: Do autor, 2016.

Usando *attractors* a cada iteração (passo 7) é possível gerar os dez painéis como um conjunto, a dificuldade está na quantidade de informação que exige muita memória do computador. Ver vídeo, com detalhes dessa geração, <https://www.youtube.com/watch?v=BgEW4qrP1S8>.

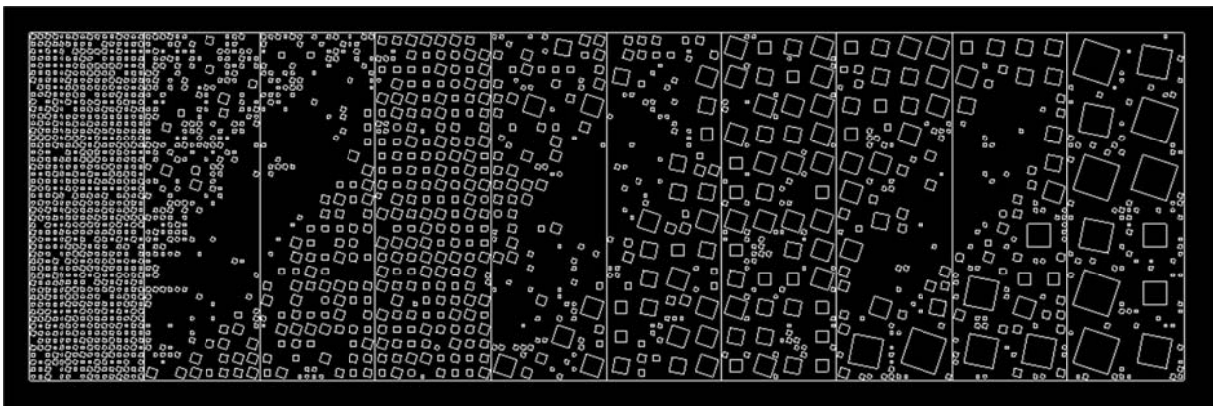
**Figura 226.** 10 painéis gerados com iterações, e *attractors*.



Fonte: Do autor, 2016.

Então foram criados os painéis individualmente, o que possibilitou maior controle buscando semelhança com o desenho original de Corsi Hirano, o resultado final é a **Figura 227**. O vídeo explica os detalhes dos painéis gerados: <https://www.youtube.com/watch?v=UG0QaCMMFA4>.

**Figura 227.** Painéis gerados individualmente com iterações e *attractors*.

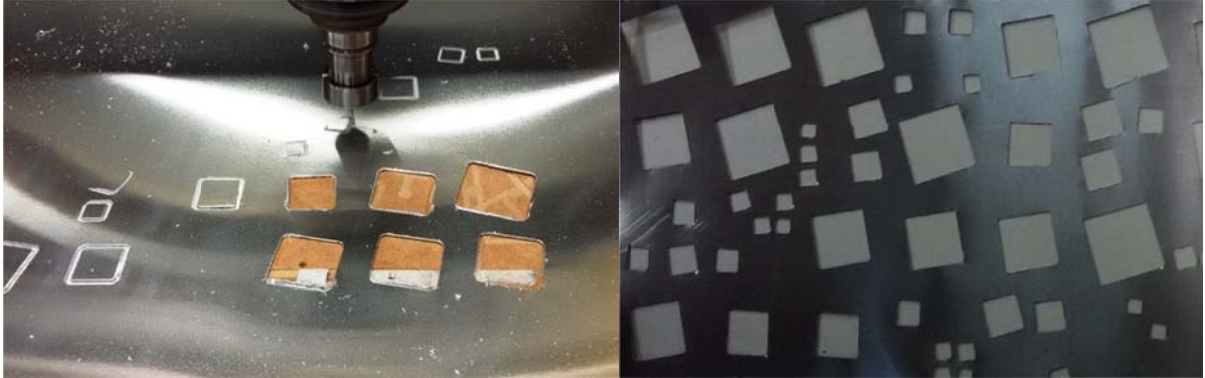


Fonte: Do autor, 2016.

Programar os painéis foi um exercício para descobrir a lógica por trás de um projeto. Foi necessário investigar os diagramas, conversar com os arquitetos e reconhecer os padrões para refazer os passos que possivelmente deram origem a este padrão. A programação visual neste caso se mostrou propícia, pois apesar do processo ter sido automatizado, há maior facilidade em visualizar os dados e muitas decisões ainda foram tomadas em aspectos subjetivos. Outra situação é que inúmeras vezes, como se pode observar nos vídeos, é necessário informar novos *inputs* (seleção de objetos no Rhino) para o Grasshopper. A

automatização ainda depende da sensibilidade do arquiteto para tomar decisões. Por fim, alguns testes com CNC e chapas de alumínio foram executados (**Figura 228**).

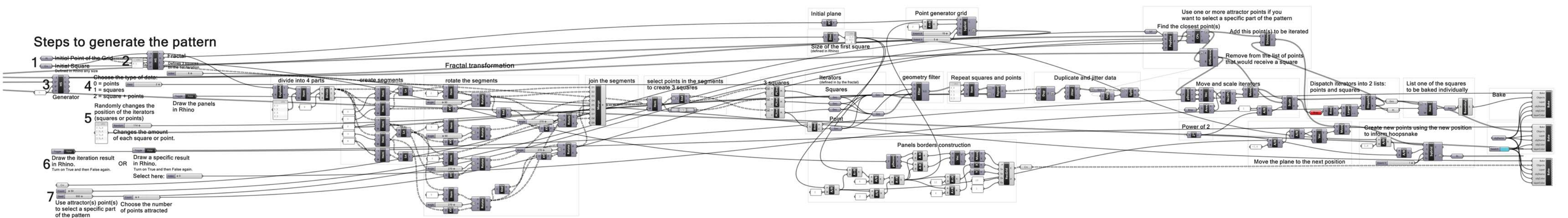
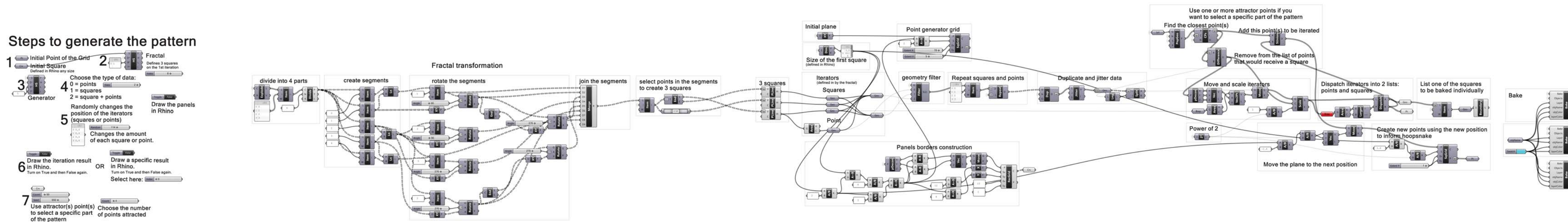
**Figura 228.** Testes de usinagem em chapa de alumínio com CNC.



Fonte: Do autor, 2016.



Figura 220. Código Grasshopper Fachada Fractal (Fonte: Do autor, 2016).



#### 8.6.6 Projeto existente, inovação: Diamniadio

Este exercício é uma experiência utilizando fractais e recursividade em um projeto urbano, resultado de um estágio de pesquisa realizado no escritório COBE de Berlim. Em 2014, o escritório COBE de Berlim projetou um novo bairro para a cidade de Dakar no Senegal: Diamniadio. Eles usaram uma grelha retangular para expressar a urbanização francesa característica da cidade de Dakar e aspectos da cultura Islâmica, que é a principal religião na cidade, no projeto.

O projeto é baseado em cinco princípios: cidade para todos, cidade para a mobilidade sustentável, cidade em 5 minutos, azul/verde e cidade saudável, cidade com uma identidade distinta. O conceito da cidade em 5 minutos permite que cidadãos futuros façam tudo caminhando curtas distâncias. Apesar de eles não terem usado fractais no projeto, eles criaram uma variação de escalas usando os edifícios religiosos como pontos atrativos. A maioria da população é de religião islâmica. Então o conceito de como cidades árabes e islâmicas são geralmente construídas também foi adaptado ao projeto de maneira que a mesquita fique a curtas distâncias da casa. A mesquita diária é uma pequena mesquita e é usada cinco vezes por dia, então é importante seja próxima das residências, a mesquita Jumma é usada mais nas sextas-feiras (mas pode ser usada diariamente), e finalmente a grande mesquita na cidade é usada uma vez por ano na celebração do Ramadan. Então esse projeto é uma oportunidade de explorar o conceito de fractais na geração do desenho urbano.

Primeiramente, estudou-se o projeto para entender seus conceitos. Desenvolveu-se um algoritmo usando Rhino e Grasshopper para criar variações de projeto e também para apresentar recursividade fractal. O componente Hoopsnake foi usado para criar iterações. A ideia foi não apenas reproduzir o conceito do projeto de COBE, mas também permitir variações. A arquiteta Vanessa Carlow do COBE explicou que eles procuraram gerar algumas variações manualmente no projeto, mas não foram implementadas no final.

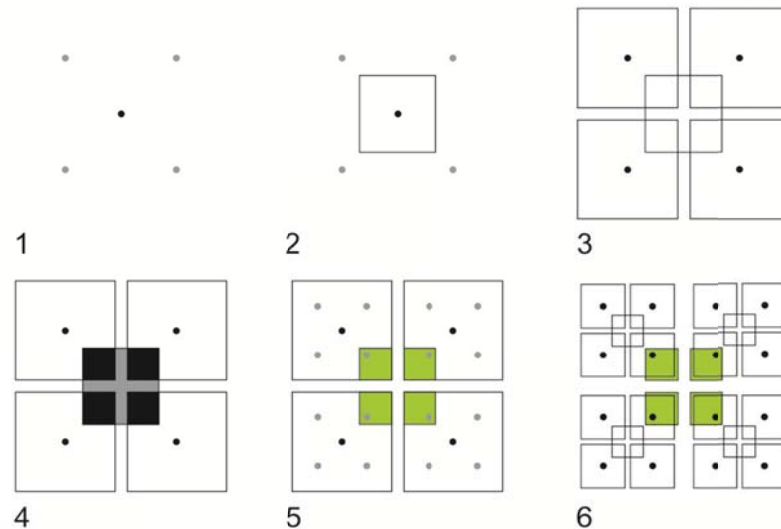
Neste código duas iterações acontecem ao mesmo tempo, primeiramente a geração de quadras com 420 metros no máximo (na terceira iteração) e em segundo lugar a geração de espaços públicos no centro de cada quatro quadras. O iniciador do fractal é um ponto genérico definido no Rhino e o gerador é um quadrado que o projetista precisa desenhar no Rhino. A **Figura 230** mostra o processo iterativo conforme descrito abaixo.

- 1- Um *grid* quadrado com uma única célula é criado usando um ponto inicial (iniciador), cada canto do *grid* recebe um novo ponto,
- 2- Um quadrado em escala é colocado no ponto central (iniciador),



- 3- Um quadrado é colocado em cada outro ponto, o ponto central não é usado mais,
- 4- Uma operação booleana resolve a intersecção entre os quadrados,
- 5- A intersecção se torna “espaço público” e os passos 1 e 2 são repetidos para cada ponto,
- 6- O passo 3 é repetido e assim por diante.

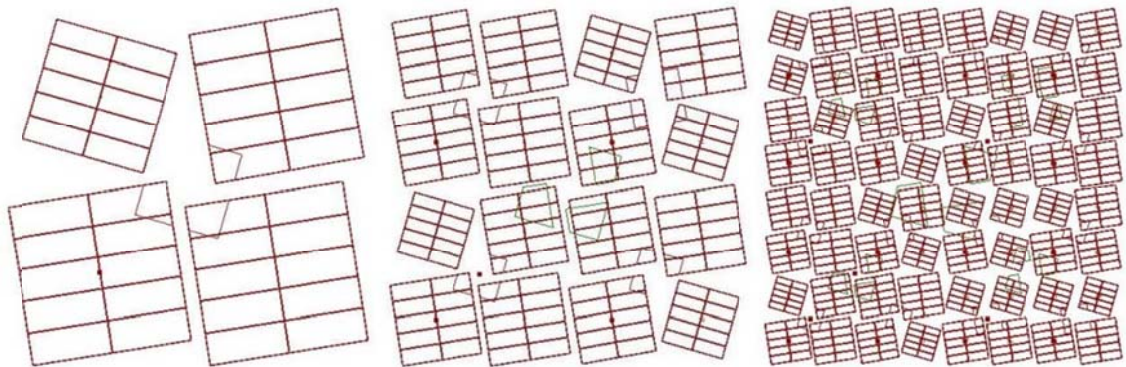
**Figura 230.** Processo generativo Diamniadio



Fonte: Do autor, 2016.

O código permite o projetista selecionar e alterar alguns parâmetros: o ângulo no qual os iteradores giram, a proporção dos quadrados, o número de ruas que dividem os quadrados e a distância entre elas. Também o componente *random* permite alterar a posição dos iteradores e a quantidade de cada iterador. O projetista pode mudar esses parâmetros enquanto itera e testa alternativas (**Figura 231**).

**Figura 231.** Processo generativo, iterações 1,2 e3.

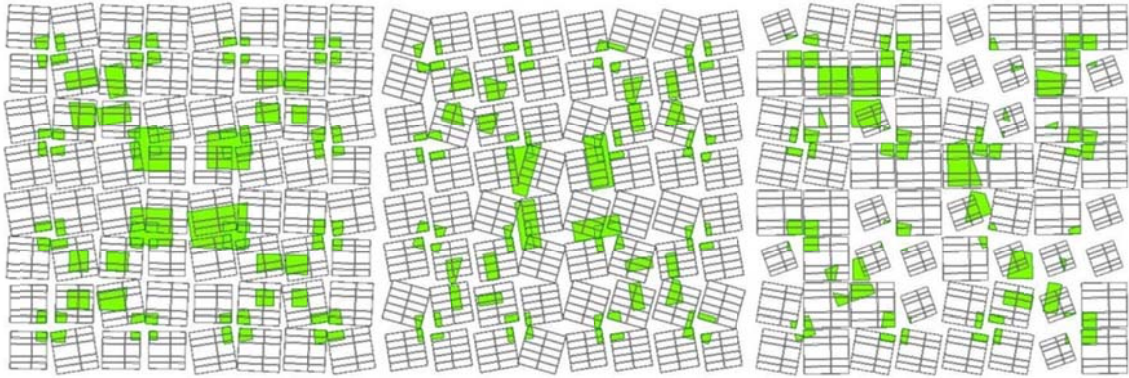


Fonte: Do autor, 2016.

Gerou-se algumas soluções para a cidade Jumma (que é composta de seis blocos de quatro quadras cada) (**Figura 232**). A ideia é criar variações no projeto, implementando os

conceitos de recursividade e hierarquia de escalas e mantendo os conceitos chave do projeto: tamanho das quadras (420m), hierarquia das ruas, espaços públicos.

**Figura 232.** Soluções A, B e C.



Fonte: Do autor, 2016.

### Processo Manual

Outras características do projeto de COBE, como a criação de áreas verdes, o muro comercial, e a presença de toda a infraestrutura pública em cada quadra foram incorporadas no projeto manualmente, pois dependem de decisões subjetivas de projeto. Apesar de ser possível implementar algoritmos que resolvam esses problemas de projeto, essas decisões de projeto são muito abstratas, então não são facilmente simuláveis computacionalmente. Nesta análise a proposta é em curto prazo gerar alternativas de projeto na fase inicial, permitindo uma discussão entre os envolvidos que realimenta o código.

Após a geração de algumas opções, uma foi selecionada para ser detalhada (**Figura 232** - opção C), pois apresentou uma distribuição mais aleatória das áreas públicas. Os primeiros passos são a conexão das ruas e a criação de uma hierarquia similar ao projeto do COBE. Então a incorporação de áreas públicas geradas pelo código, ajuste do projeto ao lago proposto, criação da divisão dos lotes, ajuste do programa básico (escolas, igrejas e creches), criação do muro de comércio e distribuição das casas (**Figura 233**).

**Figura 233.** Fases de desenvolvimento do projeto



Fonte: Do autor, 2016.



COBE usou outros conceitos para gerar o projeto como corredores verdes entre cada duas quadras e a hierarquia das ruas definem uma grelha retangular (Figura 234, Figura 235). Para este estudo as ideias de Salingeros foram aplicadas, a cidade como uma esponja, distribuindo aleatoriamente espaços verdes e praças em vez de um corredor, conforme esses espaços foram gerados pelo código ou pelo processo de desenho. No entanto, por causa do desenho dos lotes um corredor verde fica evidenciado no lado esquerdo.

Figura 234. Solução Final



Fonte: Do autor, 2016.

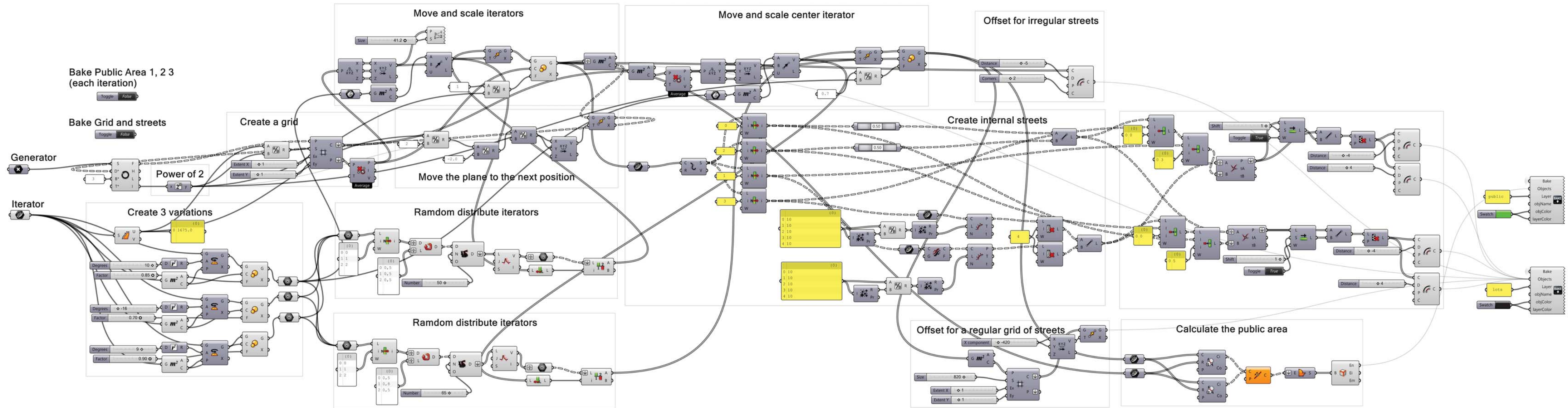
Figura 235. Projeto COBE



Fonte: Cobe, 2014.

A arquiteta Vanessa teve a oportunidade de verificar o projeto e considerou que possuem semelhanças. Ela achou interessante a variação de ângulos nas quadras deixando o aspecto final mais orgânico, que era algo que buscavam. Contudo ela levantou a questão da insolação, considerada no projeto original, ou seja, todas as casas teriam a mesma posição em relação à posição solar. Como a variação nos ângulos não é muito grande, é possível se obter um bom uso da insolação na proposta. Em alguns pontos do projeto foi utilizado como solução para organização dos lotes, as ruas em *cul-de-sac*. Segundo Vanessa o COBE não usa essa solução, pois não permite a fluidez no projeto. Argumentou-se que essa solução é usada no Brasil, pois permite um ambiente público sem tráfego de veículos que é usado pelos moradores, especialmente as crianças.

Figura 227 Código Grasshopper Diamniadio. (Fonte: Do autor, 2016).



## 9 Conclusão

*“The simplest definition of a fractal is a structure that shows complexity at any magnification”*

Nikos Salingaros.

### **Síntese da tese**

Esta tese, no capítulo 2, realiza uma investigação sobre a complexidade na arquitetura. Com o intuito de se ter uma melhor compreensão do contexto histórico explica-se brevemente a evolução dos movimentos arquitetônicos do Modernismo, passando pelo Pós-modernismo, Desconstrutivismo, e o movimento contemporâneo: Digimodernismo ou Hipermodernismo. Essa revisão da literatura mostra que os fractais são usados na arquitetura e urbanismo muito tempo antes da definição da teoria fractal e desde a década de 80 conscientemente, assim constituem uma ferramenta de projeto tanto para concepção quanto para análise. Nota-se que a GF surge praticamente no mesmo período que o movimento Pós-moderno na arquitetura, sendo rapidamente empregada por arquitetos, por sua conexão com a Teoria da Complexidade, por exemplo.

Nos anos 90 a relação entre fractais e arquitetura começa a desaparecer, segundo Ostwald (2001), ganhando força novamente nos anos 2000. Um dos motivos desse ressurgimento nos últimos anos pode ser a disseminação da programação no processo de projeto e a introdução de novas técnicas da fabricação de formas complexas. Salingaros (2012) afirma: *"computer-generated fractals are now common in our everyday environment because of our pervasive digital technology"*. Um dos efeitos da complexidade de formas e novas tecnologias na arquitetura é a visão revitalizada do conceito de ornamento assumindo funções além das decorativas.

A condenação do ornamento no período modernista se inicia com a crítica de Loos aos métodos de produção artesanal e exploração da mão de obra, uma crítica voltada para o ornamento como decoração, aplicado posteriormente. Por outro lado, nos anos seguintes o crescimento da industrialização também impactou na arquitetura, misturando essas questões sociais e econômicas. O ornamento contemporâneo tem origem nos próprios conceitos de ornamento moderno (função) e pós-moderno (simbolismo). Atualmente de modo semelhante ao movimento moderno a disponibilidade da indústria, agora de fabricação digital, permitiu junto com questões culturais uma nova visão destes conceitos.

No capítulo 3 estudaram-se conceitos matemáticos de GF, ressaltando as características generativas. Em seguida analisaram-se as aplicações dos fractais na arquitetura contemporânea (de maneira teórica) com revisão da literatura no capítulo 4. Frequentemente a

apropriação de fractais na arquitetura é motivada pela necessidade de justificar as decisões de projeto, com o intuito de gerar complexidade, ou, finalmente, buscando uma relação com a ciência. Nos exemplos mais significativos apresentados no capítulo 4, esta tese sugere como os arquitetos têm utilizado a GF no projeto: ornamento (*branching, recursive surface subdivision*, fractal clássico), estrutura e em quantidade reduzida, controle climático e volumetria. Essas maneiras de adotar fractais no projeto são as mais comuns e diretas, mas não são as únicas. Abordagens metafóricas e abstratas eram comuns no período pós-modernista, mas geralmente criavam uma mistificação do assunto, o que dificulta a compreensão do processo de projeto.

O capítulo 5 faz-se uma revisão da literatura sobre as novas tecnologias e o projeto generativo. As novas tecnologias, bem como o projeto generativo e equipamentos de fabricação digital estão bem disseminados por todo mundo, mas nem sempre estão incorporados no ensino de projeto, especialmente no Brasil. Essas novas tecnologias demandam uma série de novos conhecimentos e métodos que apontam a necessidade de metodologias de ensino mais coerentes. Esta tese procura entender maneiras de adotar esses temas, e, portanto incorporar essas práticas no projeto de arquitetura.

Diversas entrevistas com arquitetos brasileiros e internacionais são analisadas no capítulo 7. Essas conversas trouxeram informações sobre aspectos práticos dos temas abordados na tese. Essencialmente buscou-se entender como esses profissionais usam a fabricação de complexidade em arquitetura e a GF no projeto. Percebe-se que a programação é necessária para essa nova concepção de projeto, mais ainda quando se trabalha com fractais. Mais detalhes sobre as entrevistas são retomados no item Conclusão a seguir.

No capítulo 8 foi elaborada uma série de aplicações para construir um conhecimento prático que possa esclarecer métodos e instrumentos de projeto com fractais. Iniciou-se com o aprendizado pelo próprio autor de programação visual e textual programando/codificando fractais clássicos. Em seguida, foram elaborados projetos utilizando fractais para **estrutura, fachada, ornamento e urbanismo**, no qual se percebe como a GF enquanto SG pode ser útil em fases iniciais do projeto.

### Conclusão

Dentre os SGs para o projeto a GF é apenas uma das muitas possibilidades. Considerando os recursos computacionais e de fabricação disponíveis para a realização de complexidade, os arquitetos contemporâneos têm usado dessas possibilidades no projeto e construção de formas e superfícies ornamentadas. Os fractais, como SG, gerados



computacionalmente e parametricamente são apropriados para esse conceito de projeto. Contudo, é necessário mais conhecimentos, como explica Woodbury (2010:7/8):

*“[i]t turns out that these ideas are not easy, at least for those with typical design backgrounds. Mastering them requires us to be part designer, part computer scientist and part mathematician”.*

Além das habilidades acima, é importante o domínio do conhecimento dos equipamentos de fabricação por controle numérico e outras ferramentas disponíveis. Assim sendo, um novo perfil de profissional começa a ser traçado. O surgimento de uma nova geração de profissionais com esses conhecimentos tende a produzir projetos aprofundados e de qualidade funcional e estética adequados a estas novas ferramentas, ultrapassando a experimentação.

Sabe-se que a GF não é um conteúdo obrigatório no ensino fundamental, talvez esse distanciamento tornou essa geometria por muito tempo um campo de experimentação sem grande profundidade na arquitetura. Outro fato é que existe uma mistificação dos fractais como formas fantásticas capazes de criar universos. Isso é verdade quando são vistos sob a ótica matemática, mas na arquitetura existem restrições construtivas e projetuais. De qualquer maneira a GF pode ser incorporada no projeto arquitetônico, Ostwald (2009:213) comenta: *“[...] a lesson acquired from the study of fractal geometry should not necessarily result in the production of architecture that is fractal”*. O interessante é como o processo generativo e a reflexão podem ajudar na criação de formas arquitetônicas.

Apesar do significativo número de projetos com GF, a construção de edifícios gerados com fractais, por outro lado, ainda é rara. Uma prova disto são os exemplos de Ostwald (*ibid.*) descritos na seção 4.1, onde de 8 projetos apenas 2 estão construídos; os exemplos desta tese na seção 4.2, onde de 21 projetos, 12 estão construídos; e finalmente os exemplos de Burry e Burry (2010) no capítulo *Chaos, Complexity and Emergence*, onde de 5 projetos apenas 2 estão construídos. Burry e Burry (2010) acreditam que esse fenômeno é recente *“[...] this new mathematical focus has manifested in designed and built projects since the mid-1990s”*, portanto é provável que ainda surtirão novos projetos com maior aprofundamento teórico.

Salingaros (2012) afirma: *“[t]here is no reason why contemporary architects should not use fractals in their designs, but those should be more than just motifs”*, também indicando a necessidade de um aprofundamento das problemáticas do projeto. Em duas situações o uso de padrões fractais pode ser utilizado: quando o padrão responde a uma questão abstrata, trazendo significado ao projeto, por exemplo, a aplicação de projeto para

Diamniadio do COBE; e quando é projetado considerando a visão contemporânea do ornamento, como é o caso do Museu de Ciências de Corsi Hirano.

Nas entrevistas realizadas com profissionais de todo o mundo (capítulo 7), foi possível comprovar o **recente interesse (renovado) na GF**: Ostwald (2014), Moisset (2014), Harris (2015) e Gauss (2015), explicam como os fractais aparecem em projetos interessantes e inovadores. Contudo a falta de conhecimento no tema ainda traz projetos com conceitos errados ou interpretados de modo equivocado. Os fractais como outros SGs usam regras para geração que podem ser automatizadas, por isso é um método de projeto muito claro e preciso e ainda criativo.

Os entrevistados falaram sobre a necessidade de conhecer **programação** para o projeto contemporâneo a partir de suas experiências pessoais. Moisset (2014), Harris (2015), Hansmeyer (2015), Requena (2015), Schreurs (2015), Gauss (2015) e Raggatt e Raggatt (2015) citaram a programação, cada qual com uma linguagem, que faz parte da rotina destes profissionais, desde experimentações até a execução de obras de alta complexidade. Alguns dos entrevistados comentaram sobre a programação visual (Grasshopper) como a melhor opção para o projeto paramétrico atualmente.

Também se discutiu o **ornamento contemporâneo**, o qual adquire funções além de decorativas na arquitetura, cuja produção é facilitada pela fabricação digital. Harris (2015), Hansmeyer (2015), Bos (2015), Schreurs (2015), Raggatt e Raggatt (2015), consideram que o ornamento contemporâneo deve ir além da função estética. Por outro não se deve desprezar sua importância na função de comunicar o edifício para os usuários. Existem possibilidades de explorar os recursos estéticos com questões funcionais dentro da abordagem desta tese.

O **custo** da fabricação de formas complexas foi comentado por alguns dos entrevistados. Para Walz (2014) e Hansmeyer (2015), não há mais diferença entre fabricar um cubo ou uma forma irregular. Já Requena (2014) explica que no Brasil ainda é difícil acesso à tecnologia e os valores de impressão 3D podem ser muito altos; Schreurs (2015) também fornece alguns dados de como a impressão 3D ainda é cara e demorada se comparada com o uso de CNCs para fabricação de partes do edifício. Por fim, Gauss (2015) deixa claro que é necessário conhecer processos e técnicas de fabricação para que ao final do projeto não tenha que se recorrer à mão de obra humana barata para reduzir os custos.

Dessas conversas inúmeros conhecimentos importantes sobre a arquitetura contemporânea podem ser elencados, dentre eles: o projeto computacional como uma estratégia criativa, de comunicação e de controle sobre as formas; a programação como instrumento essencial para os arquitetos; e a fabricação digital que, apesar das enormes

conquistas, ainda precisa mais atenção e experiências por parte dos arquitetos. Por exemplo, Terzidis (2006) comenta sobre o problema da falta de educação computacional por parte dos arquitetos, se referindo à programação.

### **Confirmação da hipótese da tese**

A hipótese inicial da pesquisa, que considera que resultados complexos de formas podem ser obtidos com a utilização de ferramentas e métodos contemporâneos de projeto, pode ser confirmada. SGs são uma potencial ferramenta para estudar a arquitetura e gerar formas para o projeto, e se tornam mais interessantes com o auxílio da programação para o controle e da fabricação digital para a construção. Nesta tese, no entanto, os processos de avaliação e análise das formas não foram empregados em sua totalidade. Especialmente nas fases iniciais de projeto é importante avaliar algumas decisões que realimentam o processo de projeto. Foi feito um esforço em considerar questões arquitetônicas, mas uma atenção maior foi dada ao processo generativo que é a linha condutora desta pesquisa.

Como já se esclareceu anteriormente, o papel da GF como SG na arquitetura pode ser diverso. Essencialmente é uma ferramenta para gerar complexidade com formas simples. Sua conexão com a ciência e a origem na matemática são atrativos para os arquitetos que geralmente “consomente a geometria” como afirma Ostwald (2009). No projeto arquitetônico os fractais produzem tramas, padrões, ornamentos... ideias iniciais para a solução de problemas. Por exemplo o desenho de Corsi Hirano considerando as aberturas nos painéis da fachada, um recurso para o controle da iluminação e a estética do museu. No projeto urbano a compreensão de escalas na cidade é fundamental e a autossimilaridade destes padrões, geométricos e funcionais, são traduzidos pelos conceitos dos fractais. COBE apresenta muito claramente essa ideia da cidade em diversas escalas, refletindo no uso dos templos religiosos, do comércio, dos espaços públicos, praças e parques.

Alguns objetivos iniciais não puderam ser concluídos. Algumas das fontes primárias que se pretendia consultar originalmente não tiveram disponibilidade para a realização de entrevistas: o arquiteto Daniel Bosia e os arquitetos do LAB Architecture. Ambos poderiam ter relatado experiências importantes no uso dos fractais na arquitetura. Também não foi possível gerar aplicações em volumetria, que é uma das maneiras de adotar GF em arquitetura. Por outro lado, as aplicações descritas nesta tese formam uma boa base para quem deseja compreender o tema ou usá-lo em projeto. A volumetria pode ser um estudo mais avançado (como os experimentos de Harris), pois necessita de mais aprofundamento nas técnicas de programação.

## Programação para arquitetura

Esta tese, com base no levantamento bibliográfico, nas respostas dos entrevistados e nas aplicações elaboradas, sugere que **a programação é fundamental para práticas projetuais contemporâneas**. De acordo com Molinos (2015), o objetivo de aprender programação é simples:

*“Buildings are designed, built and maintained based on information. That information has to be created and curated. [...] Dealing with computers is several times simpler and more powerful if you speak their language, and that language is programming”.*

É relevante abordar tanto programação visual quanto textual, pois ambas adquirem maior alcance quando usadas em conjunto, complementando-se. Leitão, Santos (2011) fazem uma comparação semelhante e concluem que existem limitações na programação visual para tarefas mais complexas. Os autores sugerem:

*“The fact that it is possible to extend the capabilities of Grasshopper with textually scripted components is an important and useful feature that allows Grasshopper to transcend its limitations”.*

Celani, Vaz (2012), comparam a programação visual e textual sob o ponto de vista pedagógico:

*“[...] without any textual programming knowledge, applications are restricted to parametric explorations. Scripting languages, on the other hand, can be used to develop more complex implementations of generative design strategies that include the recursive application of rules, and can be combined to visual programming elements, which are more interactive and allow real time results”.*

A implementação computacional de fractais no campo da arquitetura é um tema explorado desde os anos 80, quando Yessios (1987) e Eisenman promoveram o estúdio fractal, uma experimentação com programadores e estudantes de arquitetura trabalhando em conjunto para gerar soluções de projeto. Posteriormente outras experiências com GF e programação voltadas para o ensino de arquitetura foram elaboradas: Coates e Thum (1995) com linguagem AutoLisp, Hendrickx (*et al.*, 1996) com linguagem AutoLisp, Maeda (2001) com linguagem Java, Celani (2003) com linguagem VBA, Terzidis (2006) com linguagem MEL e mais recentemente Tedeschi (2014) com o uso de Grasshopper.

Ainda assim, a aprendizagem de fractais não está formalizada ou incorporada nos conteúdos do ensino fundamental ou superior (no caso da arquitetura). Moisset (2003) e Sedrez (2009) trazem como experiência o ensino de fractais de maneira manual e computacional (ainda sem programação) respectivamente, mostrando que é possível que este



conteúdo seja usado no projeto arquitetônico, especialmente nas fases iniciais dos cursos. É importante, então, incorporar conteúdos como SGs e programação nos cursos de arquitetura.

Ao se falar sobre o projeto arquitetônico contemporâneo não é mais possível desvinculá-lo de uma prática digital. Os arquitetos têm buscado criar projetos de formas complexas com superfícies ornamentadas, isto exige novas habilidades e conhecimentos, por exemplo, a incorporação de ferramentas CNC na produção. Segundo Liao (2015) um conjunto de habilidades é necessário para o arquiteto do século XXI, dentre elas: *automation* e *coding*. Celani (*et al.*, 2015) identificam que tarefas executadas por arquitetos poderão vir a ser até 60% automatizadas num futuro próximo. Isto que significa que a automatização será incorporada pelos arquitetos para se adaptarem a essa nova realidade do mercado. Portanto o conhecimento de programação é essencial para a formação deste novo arquiteto, o qual pode ser útil na fase de concepção, de análise ou na fabricação do objeto.

A GF tem uma contribuição muito importante para os arquitetos que é a compreensão dos sistemas como um conjunto de subsistemas similares, além dos tópicos inerentes à teoria da Complexidade. Estudar os fractais ajuda aos arquitetos a perceberem melhor as escalas em um projeto, especialmente pela associação das escalas com formas naturais e com arquitetura vernacular, mais orgânica. O conhecimento de recursos computacionais especialmente a programação é necessário para trabalhar com GF, que assim pode ser potencializada para a geração de múltiplas alternativas quando combinada com a modelagem paramétrica. Os fractais geram formas que demandam uma reflexão sobre o edifício e a cidade, o programa arquitetônico, a tectônica, e principalmente as escalas.

Por fim, considera-se esta tese como uma compilação teórica e prática abrangente do uso de GF como SG na arquitetura. O resultado desta pesquisa é um delineamento do uso dos fractais na arquitetura e as várias possibilidades de aplicações no processo de projeto. Espera-se que o conteúdo desta tese seja útil para arquitetos que queiram empregar os fractais no projeto.

### **Pesquisas Futuras**

Um possível desdobramento desta pesquisa sobre complexidade é a experimentação sobre as dimensões comportamentais e perceptivas da arquitetura fractal. Taylor (2006) investiga como imagens com características fractais podem reduzir o *stress* fisiológico em indivíduos enquanto exercem atividades de raciocínio. Contudo, os experimentos de Taylor (2006) estão limitados a imagens bidimensionais, não consideram

objetos fractais tridimensionais, apesar do título de seu artigo. Apresentando-se aqui uma lacuna para estudar a arquitetura gerada com fractais e construída com fabricação digital e seus possíveis efeitos para os seres humanos.

Pesquisas futuras podem estar no campo da análise de percepção, por exemplo, efeitos da arquitetura e fractais nos seres humanos podem ser estudados como dito acima. No campo da análise urbana, em vez de análises da dimensão fractal, os fractais podem atuar como sistema generativo de formas urbanas facilitando a compreensão das escalas da cidade ou incorporando conceitos como os de Salinas. E por fim no campo do ensino de projeto, podem-se propor mudanças curriculares que englobem as novas tecnologias e SGs nos cursos de arquitetura no Brasil. Outras questões ainda podem ser discutidas a partir desta tese, por exemplo, como vincular a programação nas rotinas das disciplinas de projeto na realidade brasileira.

## 10 Referências

- AMORIM, Arivaldo Leão. Impacto das novas tecnologias nos currículos dos cursos de Arquitetura e Urbanismo. In: I Seminário Nacional A Informática no Ensino de Arquitetura, 1995, Salvador. **Anais...** do I Seminário Nacional A Informática no Ensino de Arquitetura. Salvador: FAUFBA, 1995. v. único.
- ANDERSSON, Claes; RASMUSSEN, Steen; WHITE, Roger. Urban settlement transitions. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 29, n. 6, p. 841–865, 2002.
- ASAYAMA, Shuichi; MAE, Toshifumi. Fractal structures based on the geometry of nature. In: IASS Working Groups 12, 2015, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo: Bio-based and bio-inspired environmentally compatible structures, 2015.
- BATES, Donald. Different differences. In: KOLAREVIC, Branko; KLINGER, Kevin R. **Manufacturing material effects: rethinking design and making in architecture**. New York: Routledge, 2008. p. 159–174.
- BATTY, Michael; CARVALHO, Rui; HUDSON-SMITH, Andy; MILTON, Richard; SMITH, Duncan; STEADMAN, Philip. Scaling and allometry in the building geometries of Greater London. **The European Physical Journal B**, Vol. 63, N. 3, 15 abr. P. 303–314. 2008.
- BATTY, Michael, LONGLEY, Paul A. **Fractal cities: a geometry of form and function**. Academic Press: London, 1994.
- \_\_\_\_\_. Fractal-based description of urban form. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 14, n. 2, p. 123–134, 1987.
- BEAURECUEIL, Anne Save de. Entrevista concedida à Maycon Sedrez e Gabriela Celani. em 01 out. 2012. LAPAC - Campinas. Entrevista com Anne Save de Beaurecueil. **Entrevista**, São Paulo, 14.055, Vitruvius, 2013.
- BENGUIGUI, Lucien; CZAMANSKI, Daniel; MARINOV, Maria; PORTUGALI, Yuval. When and where is a city fractal? **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 27, n. 4, p. 507–519, 2000.
- BOS, Caroline. Entrevista concedida à Maycon Sedrez em 11 jul. 2015. **The design methods of UNStudio**. Hotel Blue Tree - São Paulo. Não publicada.
- BOSIA, Daniel. Long form and algorithm. **Architectural Design**, v. 81, n. 4, p. 58–65, 2011.
- BOVILL, Carl. The Doric Order as a Fractal. **Nexus Network Journal**, v. 10, n. 2, p. 283–290, 1 out. 2008.
- \_\_\_\_\_. Fractal geometry as design aid. **Journal for Geometry and Graphics**, v. 4, n. 1, p. 71–78, 2000.
- \_\_\_\_\_. **Fractal geometry in architecture and design**. Boston: Birkhäuser, 1996.
- BREEN, Jack. Designerly enquiry. In: JONG, Taeke M.; VAN DER VOORDT, Theo J. M. **Ways to study and research urban, architectural and technical design**. Delft: DUP Science, 2002.
- BURRY, Jane; BURRY, Mark. **The new mathematics of architecture**. New York: Thames and Hudson, 2010.
- CAPRA, Fritjof. **A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. São Paulo: Cultrix, 1996.

- CAPO, Daniele. The fractal nature of the architectural orders. **Nexus Network Journal**, v. 6, n. 1, p. 30–40, 1 abr. 2004.
- CARLSON, Christopher; WOODBURY, Robert F. Hands-on exploration of recursive forms. **Technical Report**. Carnegie Mellon University. Engineering Design Research Center. 1990.
- CARPENTER, Loren C. Computer Rendering of Fractal Curves and Surfaces. In: **Computer Graphics – SIGGRAPH**, 1980, Seattle. **Proceedings...** Seattle: SIGGRAPH, 1980, v. 14, n. 3.
- CARPO, Mario. **The alphabet and the algorithm**. Cambridge: The MIT Press, 2011.
- CAVE of forgotten dreams. Direção: Werner Herzog. Produção: Erik Nelson, Adrienne Ciuffo, Dave Harding, Julian Hobbs, David McKillop. Canada, USA, France, Germany, United Kingdom: History Films, Ministère de la Culture et de la Communication Arte France, Filmproduktion, More4, 2010. 1 DVD (89 min), color.
- CELANI, Maria Gabriela. **CAD criativo**: exercícios para desenvolver a criatividade de arquitetos na era digital. São Paulo: Campus, 2003.
- CELANI, Gabriela, SEDREZ, Maycon. Ensino de projeto com a inclusão de novas tecnologias: uma abordagem pedagógica contemporânea. **Pós**. Revista do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUSUSP, v. 21, p. 78–97, 2014.
- CELANI, Gabriela, SEDREZ, Maycon, LENZ, Daniel, MACEDO, Alessandra. The future of the architect's employment. **Communications in Computer and Information Science**. 527ed. Springer Berlin Heidelberg, 2015, p. 195–212.
- CELANI, Gabriela; VAZ, Carlos Eduardo Verzola. CAD scripting and visual programming languages for implementing computational design concepts: a comparison from a pedagogical point of view. **International Journal of Architectural Computing**. Vol. 10. Nº 1. Março 2012. Multi Science Publishing: 2012.
- CELANI, Gabriela; VAZ, Carlos Eduardo Verzola; PUPO, Regiane. Sistemas Generativos de Projeto: classificação e reflexão sob o ponto de vista da representação e dos meios de produção. **Revista Brasileira de Expressão Gráfica**, v. 1, p. 22–39, 2013.
- CEPEDA, Francisco. J. D. Designing a Problem-Based Learning Course of Mathematics for Architects. **Nexus Network Journal**, v. 7, n. 1, p. 42–47, 1 abr. 2005.
- CHAN, Chen-Wei; CHIU, Mao-Lin. A simulation study of urban growth patterns with fractal geometry. In: **CAADRIA**, 2000, Singapore. **Proceedings...** Singapore: Fifth Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia, 2000, p. 55–64.
- CHASE, S. C. Generative design tools for novice designers: Issues for selection. **Automation in Construction**, v. 14, n. 6, p. 689–698, dez. 2005.
- CHEN, Yanguang; ZHOU, Yixing. Reinterpreting central place networks using ideas from fractals and self-organized criticality. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 33, n. 3, p. 345–364, 2006.
- \_\_\_\_\_. The rank-size rule and fractal hierarchies of cities: mathematical models and empirical analyses. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 30, n. 6, p. 799–818, 2003.
- COATES, Paul; THUM, Robert. **Generative modelling workbook**. London: University of East London, 1995.
- COOPER, Jon; OSKROCHI, Reza. Fractal analysis of street vistas: a potential tool for

assessing levels of visual variety in everyday street scenes. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 35, n. 2, p. 349–363, 2008.

COOPER, Jon.; WATKINSON, David; OSKROCHI, Reza. Fractal analysis and perception of visual quality in everyday street vistas. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 37, n. 5, p. 808–822, 2010.

CORCUFF, Marie-Pascale. Modularity and proportions in architecture and their relevance to a generative approach to architectural design. **Nexus Network Journal**, v. 14, n. 1, p. 53–73, 1 abr. 2012.

CORSI, Daniel. Entrevista concedida à Maycon Sedrez em 30 mai. 2014. **Fractais na arquitetura do Museu de Ciências da Unicamp**. Escritório Corsi Hirano - São Paulo. Não publicada.

CROMPTON, Andrew. Scaling in a suburban street. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 32, n. 2, p. 191–197, 2005.

\_\_\_\_\_. Fractals and picturesque composition. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 29, n. 3, p. 451–459, 2002.

\_\_\_\_\_. The fractal nature of the everyday environment. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 28, n. 2, p. 243–254, 2001.

DANTAS, Jorge R. The end of Euclidean geometry or its alternate uses in computer design. In: 14<sup>th</sup> SIGRADI, 2010, Bogotá. **Proceedings...** Bogotá: Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, 2010, p. 17–19.

DEMKO, Stephen. Construction of fractal objects with iterated function systems. In: Computer Graphics – SIGGRAPH, 1985, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: SIGGRAPH, 1985, v. 19, no. 3, p. 271–278.

DOLLINGER, Horst P. **Material, estrutura, ornamento: ejemplos de la arquitectura de hoy**. Barcelona: G. Gili, 1966.

DREWES, Frank; HABEL, Annegret; KREOWSKI, Hans-Joerg; TAUBENBERGER, Stefan. Generating self-affine fractals by collage grammars. **Theoretical Computer Science**, v. 145, n. 1–2, p. 159–187, 10 jul. 1995.

DUARTE, José Pinto. **Personalizar a habitação em série: uma gramática discursiva para as casas da Malagueira do Siza**. Tese de Doutorado. Lisboa: Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, 2007.

DUNN, Nick. **Digital fabrication in architecture**. Londres: Laurence King, 2012.

EDIZ, Özgür. “Improvising” Architecture: A fractal based approach. In: 27<sup>th</sup> eCAADe, Istanbul, 2009. **Proceedings...** Istanbul: Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2009, p. 593–598.

EDIZ, Özgür; ÇAGDAS, Gulen. A computational architectural design approach based on fractals at early design phases. In: 5<sup>th</sup> European conference on product and process modelling in the building and construction industry, 2004, Istanbul. **Proceedings...** Istanbul: eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction, 2004, p. 1055–1062.

EDIZ, Özgür; OSTWALD, Michael. The Süleymaniye Mosque: a computational fractal analysis of visual complexity and layering in Sinan’s masterwork. **arq: Architectural Research Quarterly**, v. 16, n. 02, p. 171–182, 2012.

- EDIZ, Özgür, ÇAGDAS, Gulen; ALAÇAM, Seman. A generative design model for Gaziantep's traditional pattern. In: 28<sup>th</sup> eCAADe, Zurich, 2010. **Proceedings...** Zurich: Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2010, p. 841–849.
- EGLASH, Ron. **African Fractals**. New Brunswick: Rutgers University Press, 1999.
- \_\_\_\_\_. **Homepage**. s.d. Disponível em <<http://homepages.rpi.edu/~eglash/eglash.htm>> Acesso em: 24 set. 2013.
- EISENMAN, Peter. “Eisenmanesie”. **Architecture + Urbanism**. Ed. Extra: 1988.
- FARR, R. S. Fractal design for an efficient shell strut under gentle compressive loading. **Physical Review E**, v. 76, n. 5, p. 056608-1 – 7, 30 nov. 2007.
- FASOULAKI, Eleftheria. **Integrated design**: a generative multi-performative design approach. Dissertação de Mestrado, Massachusetts Institute of Technology MIT, Cambridge, 2008.
- FENG, Jian; CHEN, Yanguang. Spatiotemporal evolution of urban form and land-use structure in Hangzhou, China: evidence from fractals. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 37, n. 5, p. 838 – 856, 2010.
- FISCHER, Thomas; HERR, Christiane M. Teaching generative design. In: International Conference on Generative Art, 2001, Milan. **Proceedings...** Milan: 4<sup>th</sup> International Conference on Generative Art, 2001.
- FLUSSER, Vilém. **O mundo codificado**: por uma filosofia do design e da comunicação. Trad. Rafael Cardoso. São Paulo: CosacNaify, 2007.
- FORD, Edward. **The details of modern architecture**. Cambridge: The MIT Press, 2003.
- FRANCIS, Sabu. Web based collaborative architectural practice using a fractal system. In: 25<sup>th</sup> eCAADe, 2007, Frankfurt. **Proceedings...** Frankfurt: Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2007, p. 727–734.
- GARCIA, Francisco; FERNANDEZ, Angel; BARRALLO, Javier. Discovering fractal geometry in CAAD: the virtual studio. In: 12<sup>th</sup> eCAADe, 1994, Glasgow. **Proceedings...** Glasgow: European Conference on Education in Computer Aided Architectural Design, 1994, p. 69–74.
- GAUSS, Florian. Entrevista concedida à Maycon Sedrez em 02 de jun. 2015. Webconferência: Stuttgart - Eindhoven. Designing and fabricating complexity. **Entrevista**. São Paulo, 17.065, Vitruvius, 2016.
- GAVRA, Hara. Contemporary ornament: from the object towards a quasi-object. **IDEA – International Doctoral Encounters in Architecture**. Ornament, algorithms and analogies: between cognitive and technological operations in architecture. Université de Montréal. 2013.
- GLEITER, Jörg H. Ornament: the battleground theory. Zona #4. Ornament. Return of the repressed. supplement to **Abitare** #494, aug 2009a.
- \_\_\_\_\_. Synopsis for the conference Digital. Material. Structural. Ornament Today. Digital. Material. Structural. **Ornament Today**. May Jun 2010, Bolzano. 2009b.
- GIPS, James. Computer implementation of shape grammars. In: NSF/MIT Workshop on shape Computation, 1999. **Anais...** 1999.
- \_\_\_\_\_. **Shape grammars and their uses**: artificial perception, shape generation and computer aesthetics. Stuttgart: Birkhäuser Verlag, 1975.

GROAT, Linda; WANG, David. **Architectural Research Methods**. London: Wiley, 2013.

GROBMAN, Yasha; NEUMAN, Eran. **Performatism: form and performance in digital architecture**. New York: Routledge, 2011.

HAGGARD, Kenneth; COOPER, Polly; GYOVAI, Christine. **Fractal architecture: design for sustainability**. North Charleston: BookSurge Publishing, 2006.

HANSMEYER, Michael. Entrevista concedida à Maycon Sedrez em 20 mar. 2015. **Additive manufacturing**. Correio eletrônico: Kyoto - Eindhoven. Não publicada.

\_\_\_\_\_. **Digital Grotesque**. 2013. Disponível em: <[http://www.michael-hansmeyer.com/projects/digital\\_grotesque.html?screenSize=1&color=1](http://www.michael-hansmeyer.com/projects/digital_grotesque.html?screenSize=1&color=1)> Acesso em: 05 fev. 2015.

\_\_\_\_\_. **Columns**. 2010. Disponível em: <<http://www.michael-hansmeyer.com/projects/columns.html?screenSize=1&color=1>> Acesso em: 05 fev. 2015.

\_\_\_\_\_. **Platonic Solids**. 2008. Disponível em: <[http://www.michael-hansmeyer.com/projects/platonic\\_solids.html?screenSize=1&color=1](http://www.michael-hansmeyer.com/projects/platonic_solids.html?screenSize=1&color=1)> Acesso em: 05 fev. 2015.

\_\_\_\_\_. **Pavilions**. 2006. Disponível em: <[http://www.michael-hansmeyer.com/projects/initial\\_subdivision\\_studies.html?screenSize=1&color=1](http://www.michael-hansmeyer.com/projects/initial_subdivision_studies.html?screenSize=1&color=1)> Acesso em: 05 fev. 2015.

\_\_\_\_\_. **L-systems**. 2003. Disponível em: <<http://www.michael-hansmeyer.com/projects/l-systems.html?screenSize=1&color=1>> Acesso em: 05 fev. 2015.

HARRIS, James. Entrevista concedida à Maycon Sedrez em 20 fev. 2015. **Programming fractals and architecture**. Correio eletrônico: New York - Campinas. Não publicada.

\_\_\_\_\_. **Fractal Architecture: organic design philosophy in theory and practice**. New México: University of New Mexico Press, 2012.

\_\_\_\_\_. Integrated Function Systems and Organic Architecture from Wright to Mondrian. **Nexus Network Journal**, v. 9, n. 1, p. 93–102, 1 mar. 2007.

HAYLES, N. Katherine. **Chaos and order: complex dynamics in literature and science**. University of Chicago Press: Chicago, 1991.

\_\_\_\_\_. Chaos as orderly disorder: shifting ground in contemporary literature and science. **New Literary History**, v. 20, n. 2, p. 305-322, 1990.

HENDRICX, Ann; NEUCKERMANS, Herman; VANDEVYVERE, Han; NUYTS, Kris. CAAD in Pedagogical Practice. In: 14<sup>th</sup> eCAADe, 1996, Lund. **Proceedings...** Lund: Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 1996, p. 199–210.

HENSEL, Michael; SUNGUROGLU, Defne; MENGES, Achim. Material performance. **Architectural Design**, v. 78, n. 2, p. 34–41, 2008.

HERR, Christiane H. Generative Architectural Design and Complexity Theory. In: International Conference on Generative Art, 2002, Milan. **Proceedings...** Milan: International Conference on Generative Art, 2002, p. 16,1–16,13.

HERSHBERGER, Robert. **Architectural programming and predesign manager**. McGraw-Hill Professional Publishing, 1999.

HEYLIGHEN, Francis; CILLIERS, Paul; GERSHENSON, Carlos. Complexity and philosophy. In: BOGG, Jan.; GEYER, Robert. **Complexity, science and society**. Oxford: Radcliffe Publishing, 2007.

HOLL, Steven. **Sarphatistraat Offices**. 2000. Disponível em: <<http://www.stevenholl.com/project-detail.php?id=41&worldmap=true>> Acesso em: 06 ago. 2015.

HORNBY, Gregory S.; POLLACK, Jordan B. The advantages of generative grammatical encodings for physical design. In: Congress on Evolutionary Computation, 2001, Seoul. **Proceedings...** Seoul: Congress on Evolutionary Computation, 2001, p. 600–607.

IBRAHIM, Madgy M.; KRAWCZYK, Robert J. Generating fractals based on spatial organizations. **Computer graphics and geometry**, vol. 8.2, 2006, p. 3–15.

INDRAPRASTHA, Aswin; SAHPUTRA, Zulhadi; SUHARJONO, Agus. Preserving local ornament through algorithm. **Journal of Computer Science and Information**, vol. 6, nº 2, 2013, p. 52–58.

INPHINIART. **First International Conference on Fractal Foundations for 21st Century Architecture and Environmental Design**. 2004. Disponível em: <<http://www.inphiniart.com/congreso/home.htm>> Acesso: 05 mar. 2008.

IWAMOTO, Lisa. **Digital fabrications: architectural and material techniques**. New York: Princeton Architectural Press, 2009.

\_\_\_\_\_. **The new paradigm in architecture: the language of post-modernism**. New Haven: Yale Press University, 2002.

\_\_\_\_\_. **The architecture of the jumping universe: a polemic, how complexity science is changing architecture and culture**. London: Academy, 1997a.

\_\_\_\_\_. Nonlinear architecture. In: TOY, Maggie. **New Science = new architecture? AD Architectural Design**. New York: John Wiley, 1997b.

\_\_\_\_\_. The death of modern architecture. In: **The language of post-modern architecture**. Nova York: Rizzoli, 1977.

JOHNSON, Jeffrey; ZAMENOPOULOS, Theodore; ALEXIOU, Katerina. In: European Conference on Complex Systems, 2005, Paris. **Proceedings...** Paris: ECCS - Embracing Complexity in Design, 2005.

JOHNSON, Philip; WIGLEY, Mark. **Deconstructivist architecture**. New York: Museum of Modern Art, 1988.

JONES, Owen. **The grammar of ornament**. London: Bernard Quaritch, 1910.

JOYE, Yannick. A review of the presence and use of fractal geometry in architectural design. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 38, n. 5, p. 814–828, 2011.

\_\_\_\_\_. Fractal architecture could be good for you. **Nexus Network Journal**, vol. 9, no. 2, 2007, p. 311–320.

\_\_\_\_\_. Cognitive and Evolutionary Speculations for Biomorphich Architecture. **Leonardo**, v. 39, n. 2, p. 145–152, 1 abr. 2006.

\_\_\_\_\_. Evolutionary and Cognitive Motivations for Fractal Art in Art and Design Education. **International Journal of Art & Design Education**, v. 24, n. 2, p. 175–185, 2005.



- KIPNIS, Jeffrey. **Towards a new architecture**. AD Folding in architecture. N. 102. John Wiley and Sons Ltd. London, 1993.
- KIRBY, Alan. **Digimodernism**: how new technologies dismantle the postmodern and reconfigure our culture. New York: Continuum, 2009.
- KOBAYASHI, Yoshihiro; SUBHADHA, Battina. Housing layout design using fractals: a computer tool and its practical use. In: 11<sup>th</sup> CAAD Futures, 2005, Viena. **Proceedings...** Viena: International Conference CAAD Futures, 2005, p. 119–128.
- KOLAREVIC, Branko. Entrevista concedida à Gabriela Celani em dez. 2013. LAPAC - Campinas. Chat with Branko Kolarevic. Publicado em: **PARC**, v. 4, n. 2, Campinas, dezembro de 2013, p.38–44.
- \_\_\_\_\_. **Architecture in the digital age**: design and manufacturing. London: Spon, 2003.
- KOLAREVIC, Branko; KLINGER, Kevin R. **Manufacturing material effects**: rethinking design and making in architecture. New York: Routledge, 2008.
- LAB Architecture Studio. S.D. Disponível em: <www.labarchitecture.com> Acesso: 18 nov. 2008.
- LANDRENEAU, Eric; OZENER, Ozan O.; PAK, Burak; AKLEMAN, Ergun; KEYSER, John. Interactive rule-based design: an experimental interface for conceptual design. In: LEEUWEN, Jos P. van; TIMMERMANS, Harry J. P. (ed.). **Innovations in design and decision support systems in architecture and urban planning**. Dordrecht: Springer, 2006, p. 433–446.
- LEACH, Neil. Digital Cities. **Architectural Design**, v. 79, n. 4, p. 6–13, 2009.
- LEE, Myung-Sik. Application of fractal geometry to architectural design. **Architectural Research**, v. 16, n° 4, 2014, p. 175–183.
- LEE, Sang; HOLZHEU, Stephanie. Building envelope as surface. In: LEE, Sang. **Aesthetics of sustainable architecture**. Rotterdam: 010 Publishers, 2011.
- LEITÃO, António; SANTOS, Luís. Programming languages for generative design: visual or textual?, In: 29<sup>th</sup> eCAADe, 2011, Ljubljana. **Proceedings...** Ljubljana: Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2011, 549–557.
- LEVIT, Robert. Contemporary ornament: the return of the symbolic repressed. **Harvard Design Magazine**, n. 28, Spring Summer 2008.
- LÉVY, Pierre. **Cibercultura**. Trad. Carlos Irineu da Costa. São Paulo: Ed. 34, 1999.
- LEWIS, David J. Opportunities of hybrid operations. In: KOLAREVIC, Branko; KLINGER, Kevin R. **Manufacturing material effects**: rethinking design and making in architecture. New York: Routledge, 2008. p. 175–182.
- LIAO, Alice. The 21<sup>st</sup>-Century skill set for architects: designers who evolve and diversify their areas of expertise will stay relevant in the profession. **Architect Magazine**, Jun. 2015.
- LINDENMAYER, Aristid; PRUSINKIEWICZ, Przemyslaw. **The algorithmic beauty of plants**. New York: Springer-Verlag, 2004.
- LIPOVETSKY, Gilles. **Os tempos hipermodernos**. São Paulo: Barcarolla, 2004.
- LOOS, Adolf. **Ornamento e Crime**. Lisboa: Cotovia, 2004.
- LORENZ, Edward N. **A essência do caos**. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 1996.

\_\_\_\_\_. Predictability; does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas? **Massachusetts Institute of Technology**, Cambridge. December 29, 1972. Sheraton Park Hotel. American Association for the Advancement of Science, 139<sup>th</sup> Meeting.

LORENZ, Wolfgang E. Measurability of Loos' rejection of the ornament: using box-counting as a method for analyzing facades. In: 32<sup>nd</sup> eCAADe, 2014, Newcastle. **Proceedings...** Newcastle: Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, v. 2, 2014. p. 495–504.

\_\_\_\_\_. Estimating the fractal dimension of architecture: using two measurement methods implemented in AutoCAD by VBA. In: 30<sup>th</sup> eCAADe, 2012, Prague. **Proceedings...** Prague: Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, v. 1, 2012, p. 505–513.

\_\_\_\_\_. Fractal geometry of architecture: Implementation of the Box-Counting Method in a CAD-Software. In: 27<sup>th</sup> eCAADe, 2009, Istanbul. **Proceedings...** Istanbul: Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2009, p. 697–704.

\_\_\_\_\_. **Fractals and fractal architecture**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Tecnologia de Viena, Viena, 2002.

LOVERIDGE, Russel; STREHLKE, Kai. The digital ornament using CAAD/CAAM technologies. **International Journal of Architectural Computing – IJAC**. v. 4, p.33–49. 2006.

LU, Shaoming. Hidden orders in Chinese gardens: irregular fractal structure and its generative rules. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 37, n. 6, p. 1076–1094, 2010.

LU, Yongmei; TANG, Junmei. Fractal dimension of a transportation network and its relationship with urban growth: a study of the Dallas - Fort Worth area. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 31, n. 6, p. 895–911, 2004.

LUCA, Caneparo. Generative platform for urban and regional design. **Automation in Construction**, v. 16, n. 1, p. 70–77, jan. 2007.

LYNN, Greg. Curvilinearidade arquitetônica: o dobrado [folded], o maleável [pliant], e o flexível [supple]. In: SYKES, Krista. **O campo ampliado da arquitetura: antologia teórica 1993-2009**. São Paulo: Cosac Naify, 2013.

LYNN, Greg; DELEUZE, Gilles. **Folding in architecture**. Chichester: Wiley-Academy, 2004.

MAEDA, John. **Design by numbers**. Cambridge: MIT Press, 2001.

MAINZER, Klaus. Strategies for shaping complexity in nature, society, and architecture. In: GLEINIGER, Andrea; VRACHLIOTIS, Georg. **Complexity: design strategy and world view**. Berlin: Birkhäuser, 2008.

MANDELROT, Benoît B. **Objetos fractais: forma, acaso e dimensão seguido de panorama da linguagem fractal**. 2 ed. Lisboa: Gradiva, 1998.

\_\_\_\_\_. **The fractal geometry of nature**. New York: W. H. Freeman, 1983.

\_\_\_\_\_. **Fractals: form, chance and dimension**. New York: W.H. Freeman, 1977.

MARQUES, Mara Lúcia. Análise direcional do crescimento urbano da região metropolitana de São Paulo entre 1905 e 2001, utilizando-se a dimensão fractal. **Pós**. Revista do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUSUSP, v. 23, p. 100–118, 2008.

MEREDITH, Michael. **From control to design: parametric/algorithmic architecture**.

Barcelona: Actar, 2008.

MITCHELL, W. J. Constructing Complexity. In: CAAD Futures, 2005, Viena. **Proceedings...** Viena: Computer Aided Architectural Design Futures, 2005, p. 41–50.

\_\_\_\_\_. The theoretical foundation of computer-aided architectural design. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 1, n. 2. 1978, p. 127–150.

MOISSET, Inés. **Fractales y formas arquitectónicas**. Córdoba: I+P División Editorial, 2003.

\_\_\_\_\_. Entrevista concedida à Maycon Sedrez em 08 dez. 2014. **Fractais e arquitetura**. Correio eletrônico: Córdoba - Campinas. Não publicada.

MOORE, Charles W.; MITCHELL, William J.; TURNBULL, William. **The poetics of gardens**. Cambridge: MIT Press, 1993.

MORIN, Edgar. **Introdução ao pensamento complexo**. Lisboa: Instituto Piaget, 1991.

MOUSSAVI, Farshid; KUBO, Michael. **The function of ornament**. Barcelona: Actar, 2006.

NAOUMOVA, Natalia; BOURCHTEIN, Andrei; BOURCHTEIN, Lioudmila. Sobre dimensões fractais de ambientes construídos e naturais. **Pós**. Revista do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUSUSP, v. 21, nº 36, p. 174–192, 2014.

NEVES, Isabel C.; ROCHA, João; DUARTE, José P. Research in architecture: the legacy of the Hochschule für Gestaltung, Ulm. **International Journal of Architectural Computing**, 1, v.12., 2014.

OLESCHKO, Klaudia; BRAMBILA, Rosa; BRAMBILA, Fernando; PARROT, Jean-Francois; LÓPEZ, Pedro. Fractal analysis of Teotihuacan, México. **Journal of Archaeological Science**, v. 27, n. 11, p. 1007–1016, nov. 2000.

OSTWALD, Michael J. Entrevista concedida à Maycon Sedrez em 28 jul. 2014. **Issues about Fractal Architecture**. Correio eletrônico: Newcastle - Campinas. Não publicada.

\_\_\_\_\_. Ethics and the auto-generative design process. **Building research and information**. 38:4, p. 390–400, 2010.

\_\_\_\_\_. **Fractal architecture**: knowledge formation within and between architecture and the sciences of complexity. Saarbrücken: VDM Verlag, 2009.

\_\_\_\_\_. “Fractal architecture”: late twentieth century connections between architecture and fractal geometry. **Nexus Network Journal**, vol. 3, no. 1, Winter 2001.

OSTWALD, Michael; TUCKER, Chris. Measuring architecture: questioning the application of non-linear mathematics in the analysis of historic buildings. In: IV International Conference of the Association of Architecture Schools of Australasia, 2007, Sydney. **Proceedings...** Sydney: International Conference of the Association of Architecture Schools of Australasia, 2007, p. 183–189.

OSTWALD, Michael J.; VAUGHAN, Josephine. A data-cluster analysis of façade complexity in the early house designs of Peter Eisenmann. In: 27<sup>th</sup> eCAADe, 2009, Istanbul. **Proceedings...** Istanbul: Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2009, p. 729–736.

OSTWALD, Michael J.; VAUGHAN, Josephine; CHALUP, Stephan. Data flow and processing in the computational fractal analysis method. In: 16<sup>th</sup> CAADRIA, 2011, Newcastle. **Proceedings...** Newcastle: International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia, 2011, p. 493–502.

\_\_\_\_\_. A computational investigation into the fractal dimensions of the architecture of Kazuyo Sejima. **Principles & Practices: An International Journal**. v. 3, n. 1, p. 231–244, 2009.

\_\_\_\_\_. A computational analysis of fractal dimensions in the architecture of Eileen Gray. In: 28<sup>th</sup> ACADIA, 2008, Minneapolis. **Proceedings...** Minneapolis: Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, 2008, p. 256–263.

OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert. **The new structuralism**. AD Architectural Design. London: Wiley, 2010.

OXMAN, Rivka. Digital design didactics: re-thinking design theory, methodology and pedagogy. In: STEINO, Nicolai; ÖZKAR, Mine, Org. **Shaping design teaching: explorations into the teaching of form**. Aalborg: Aalborg University Press, 2012.

\_\_\_\_\_. **Digital architecture as a challenge for design pedagogy: theory, knowledge, models and medium**. Design Studies, no. 29, 2008, p. 99–120.

PALMA, Niara. Estudos urbanos e geometria fractal. **Revista de Morfologia Urbana**. Vol. 2, n. 1, 2014, p. 15–24.

PATLAKAS, Panagiotis. Maths and crafts: fractals for small-scale design. In: 19<sup>th</sup> CAADRIA, 2014, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: Association for Computer-aided Architectural Design Research in Asia, 2014, p. 503–512.

PEITGEN, Heinz-Otto; SAUPE, Dietmar; BARNSLEY, Michael F. **The science of fractal images**. New York: Springer, 1988.

PICON, Antoine. In: EDNIE-BROWN, Pia; BURRY, Mark; BURROW, Andrew. Architecture, innovation and tradition. **AD – Architectural Design**. January/February, n. 221, p128–133, 2013a.

\_\_\_\_\_. **Ornament: the politics of architecture and subjectivity – AD Primer**. London: Wiley, 2013b.

\_\_\_\_\_. **Digital Culture in Architecture**. Basel: Birkhäuser Architecture, 2010.

RAGGATT, Howard; RAGGATT, Mark. Entrevista concedida à Maycon Sedrez em 07 out. 2015. **Subverting architecture: politics and technology**, ARM. Melbourne. Não publicada.

RAGGATT, Howard; WARD, Maitiú. **Mongrel rapture: the architecture of Ashton Raggatt McDougall**. Melbourne: Uro Publications, 2015.

RASHAD, Ahmed; ALFARIS, Anas. A performance based generative design system methodology for sustainable design in practice. **Conference on Technology & Sustainability in the Built Environment**. p. 181–198. 2012.

REISER, Jesse. **Reiser + Umemoto: atlas of novel tectonics**. New York: Princeton Architectural Press, 2006.

REQUENA, Guto. Entrevista concedida à Maycon Sedrez em 27 out. 2014. **Projeto computacional e fabricação digital no Brasil**. Escritório Guto Requena - São Paulo. Não publicada.

RUMIEZ, Agnieszka. Fractal architecture. **Architecture and Urban Planning**. Vol. 8, 2013, p. 45–49.

SALA, Nicoletta. Fractal geometry and architecture: some interesting connections. **Eco-Architecture: Harmonisation between Architecture and Nature**. v. 86, p. 163–173. 2006.

\_\_\_\_\_. The role of new technologies to support the teaching and the learning of mathematics. **International Journal of Continuing Engineering Education and Life Long Learning**, v. 13, n. 3, p. 303–317, 1 jan. 2003.

SALA, Nicoletta; CAPPELLATO, Gabriele. **Architettura della complessità: la geometria frattale tra arte, architettura e territorio**. Milano: Franco Angeli, 2004.

SALINGAROS, Nikos A. Fractal art and architecture reduce physiological stress. **Journal of Biourbanism**. 2012-2. ISB: Rome, 2012.

\_\_\_\_\_. **Twelve lectures on architecture: algorithmic sustainable design**. Munchen: Umbau-Verlag, 2010.

\_\_\_\_\_. **Anti-architecture and deconstruction**. 2<sup>nd</sup> Ed. Munchen: Umbau, 2008.

\_\_\_\_\_. **A theory of architecture**. Solingen: Umbau-Verlag, 2007.

\_\_\_\_\_. **Principles of Urban Structure**. Amsterdam: Techne Press, 2005.

\_\_\_\_\_. Connecting the fractal city. In: **Principles of Urban Structure**. Amsterdam: Techne Press, 2005a.

\_\_\_\_\_. Ecology and the fractal mind in the new architecture: a conversation. **RUDI – Resource for Urban Design Information**, 1999a.

\_\_\_\_\_. Architecture, Patterns, and Mathematics. **Nexus Network Journal**, v. 1, n. 1–2, p. 75–86, 1 jun. 1999b.

SCHREURS, Pieter. Entrevista concedida à Maycon Sedrez em 04 mai. 2015. Escritório ONL - Rotterdam. One building, one detail. **Entrevista**, São Paulo, 16.064, Vitruvius, 2015.

SCHMITT, Gerhard. Expert Systems and interactive fractal generators in design and evaluation. In: CAAD Futures, 1987, Eindhoven. **Proceedings...** Eindhoven: CAAD Futures, 1987, p. 91–106.

SCHMITT, Gerhard N.; CHEN, Chen-Cheng. Classes of design — classes of methods — classes of tools. **Design Studies**, v. 12, n. 4, p. 246–251, out. 1991.

SCHUMACHER, Patrick. Parametric patterns. **Architectural Design**, v. 79, n. 6, p. 28–41, 2009.

SILVA, Neander F.; BRIDGES, Alan H.; LIMA, Ecilamar M.; MORAIS, Helen R. A.; SILVA JUNIOR, Félix A. **A indústria da Construção Civil está Pronta para a Fabricação Digital e a Customização em Massa? Uma Pesquisa sobre um Caso Brasileiro**. In: SIGraDI, 2009, São Paulo. Anais... São Paulo: SIGraDI, 2009, p 430–432.

SEDREZ, Maycon. A contribuição da arquitetura fractal para o ensino de CAAD. **Oculum Ensaios**, v. 0, n. 11\_12, 23 abr. 2012.

\_\_\_\_\_. **Forma fractal no ensino de projeto arquitetônico assistido por computador**. Dissertação de Mestrado, PósArq – Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SEDREZ, Maycon R.; BAIER, Tânia; KRINDGES, Eliana E. Árvores fractais no ensino fundamental e na arquitetura. In: IV Jornada Nacional de Educação Matemática e XVII Jornada Regional de Educação Matemática, 2012, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: IV JNEM e XVII JREM, 2012.

SEDREZ, Maycon; MENEGHEL, Rafael. Projeto paramétrico com fractais no detalhamento de uma fachada. **PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 4, p. 19–26, 2013.

- SEDREZ, Maycon; MENEGHEL, Rafael; CELANI, Gabriela. Programação visual e textual para a geração de composições com geometria fractal: um estudo comparativo. In: SBQP TIC - III Simpósio Brasileiro de Qualidade no Projeto do Ambiente Construído e VI Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção, v. 1, 2013, Campinas. **Anais...** Campinas: SBQP TIC, 2013, p. 301–312.
- SEDREZ, Maycon; PEREIRA, Alice T. C. Fractal shape. **Nexus Network Journal**, p. 1–11, 2012.
- SEDREZ, Maycon; PEREIRA, Alice T. C.; SANTIAGO, Alina G. Paisagem fractal: uma análise da conectividade na escala humana. In: Encontro Nacional de Ensino de Paisagismo em Escolas de Arquitetura e Urbanismo no Brasil, 2008, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ENEPEA, 2008.
- SERRATO-COMBE, Antonio. Lindenmayer Systems: experimenting with software string rewriting as an assist to the study and generation of architectural form. In: 23th eCAADe, 2005, Lisboa. **Proceedings...** Lisboa: Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2005, p. 615–621.
- SORGUÇ, Arzu G. Teaching Mathematics in Architecture. **Nexus Network Journal**, v. 7, n. 1, p. 119–124, 1 abr. 2005.
- STAVRIC, M.; MARINA, O. Parametric modeling for advanced architecture. **International Journal of Applied Mathematics and Informatic**, v. 5, p. 9–16, 2011.
- STEIM, Ivana P. I.; SILVA, Adriane B. A. da; PIRES, Janice de F. Aproximação ao conceito de fractal através da experimentação: uma abordagem didática. In: SIGraDi, 2012, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SIGraDI, 2012, p.223–225.
- STINY, George. The algebras of design. **Research in Engineering Design**, v. 2, n. 3, p. 171–181, 1 set. 1991.
- SULLIVAN, Louis H. The tall office building artistically considered. **Lippincott's Magazine**. March, 1896.
- \_\_\_\_\_. Ornament in architecture. In: **Kindergarten chats and others writings**. (Publicado originalmente em The engineering magazine, vol. 3, n. 5, p 633–644, 1892). 1918.
- TAMKE, Martin; THOMSEN, Mette R. Implementing digital crafting: developing It's a small world. **Case Studies – Design Modelling Symposium**. p. 321–329. 2009.
- TANNIER, Cécile; VUIDEL, Gilles; HOUOT, Hélène; FRANKHAUSER, Pierre. Spatial accessibility to amenities in fractal and nonfractal urban patterns. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 39, n. 5, p. 801–819, 2012.
- TAYLOR, Richard P. Reduction of physiological stress using fractal art and architecture. **Leonardo**, v. 39, n. 3, June 2006, p. 245–251. 2006.
- TEDESCHI, Arturo. **AAD\_ Algorithms-aided design**: parametric strategies using grasshopper. Brienza: Le Penseur, 2014.
- TEDglobal. Ron Eglash: the fractals at the heart of African designs. **TED Talks**. 2007. Disponível em: <[http://www.ted.com/talks/ron\\_eglash\\_on\\_african\\_fractals.html](http://www.ted.com/talks/ron_eglash_on_african_fractals.html)> Acesso em: 24 set. 2013.
- TERZI, Faith; KAYA, H. Serdar. Dynamic spatial analysis of urban sprawl through fractal geometry: the case of Istanbul. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 38, n. 1, p. 175–190, 2011.

TERZIDIS, Kostas. Design inside the Chinese Room. **International Journal of Architectural Computing**, v. 6, n. 3, p. 361–370, 1 set. 2008.

THOMAS, Isabelle; FRANKHAUSER, Pierre; FRENAY, Benoit; VERLEYSEN, Michel. Clustering patterns of urban built-up areas with curves of fractal scaling behaviour. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 37, n. 5, p. 942–954, 2010.

TIBBITS, Skylar. Design to Self-Assembly. **Architectural Design**, v. 82, n. 2, p. 68–73, 2012.

TIDAFI, Temy; IORDANOVA Ivanka. Experimental Approach in an Architectural Design Studio - How Digital Technologies Could Change a Design Process. In: 24<sup>th</sup> eCAADe, 2006, Volos. **Proceedings...** Volos: Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2006, p. 852–858.

TINNIRELLO, A.; VOGET, R.; FEDERICO, S. De. Mathematics formation and creative design. Fourth International Conference of Mathematics and Design, 2004. **Journal of Mathematics and Design**, vol. 4, n<sup>o</sup> 1, p. 225–229, 2004.

TRILLING, James. **The language of ornament**. London: Thames and Hudson, 2001.

VENTURI, Robert. **Complexidade e contradição em arquitetura**. São Paulo: Martins Fontes, 1995. Tradução de: Complexity and contradiction in architecture.

VENTURI, Robert; IZENOUR, Steven; BROWN, Denise S. **Learning from Las Vegas: the forgotten symbolism of architectural form**. Cambridge: MIT Press, 1972.

VAUGHAN, Josephine; OSTWALD, Michael J. The relationship between the fractal dimension of plans and elevations in the architecture of Frank Lloyd Wright: comparing the Prairie style, textile block and Usonian periods. **Architecture science**, n. 4, p. 21–44, 2011.

\_\_\_\_\_. Using fractal analysis to compare the characteristic complexity of nature and architecture: re-examining the evidence. **Architectural Science Review**, v. 53, n. 3, p. 323–332, 2010a.

\_\_\_\_\_. Refining a computational fractal method of analysis: testing Bovill's architectural data. In: 15<sup>th</sup> CAADRIA, 2010, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia, 2010b, p. 29–38.

\_\_\_\_\_. Refining the computational method for the evaluation of visual complexity in architectural images: significant lines in the early architecture of Le Corbusier. **Computation: The New Realm of Architectural Design**. In: 27<sup>th</sup> eCAADe, 2009a, Istanbul. **Proceedings...** Istanbul: Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2009a, p. 689–696.

\_\_\_\_\_. Calculating visual complexity in Peter Eisenman's architecture. In: 14<sup>th</sup> CAADRIA, 2009, Yunlin. **Proceedings...** Yunlin: International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia, 2009b, p. 75–84.

VERNER, Igor M.; MAOR, Sarah. The effect of integrating design problems on learning mathematics in an architecture college. **Nexus Network Journal**, v. 5, n. 2, p. 103–115, 1 out. 2003.

VIOS, Ramon N.; RAMILO, Ruddy D. Digital innovation in design practices: a case study on digital design tools and processes. **International Journal of Engineering Research and Science & Technology**. Vol. 2, n. 3, 2013, p. 119–150.

VYZANTIADOU, M. A.; AVDELAS, A. V.; ZAFIROPOULOS, S. The application of fractal geometry to the design of grid or reticulated shell structures. **Computer-Aided Design**, v. 39, n. 1, p. 51–59, jan. 2007.

WAGENSBERG, Jorge. **La rebelión de las formas**. Barcelona: TusQuets, 2005.

WALZ, Arnold. Entrevista concedida à Maycon Sedrez e Gabriela Celani em 03 jun. 2014. Campinas. The form doesn't matter: interview with Arnold Walz. **Entrevista**, São Paulo, 15.058, Vitruvius, 2014.

WANG, Wen; MA, Xueqiang; LIU, Hong. Application of fractals in architectural shape design. 2010. In: IEEE 2<sup>nd</sup> Symposium on Web Society, 2010, Beijing. **Proceedings...** Beijing: IEEE 2<sup>nd</sup> Symposium on Web Society, 2010.

\_\_\_\_\_. A computer-aided harmonious architecture design method based on fractals. In: 4<sup>th</sup> International Conference on Natural Computation, 2008, Los Alamitos. **Proceedings...** Los Alamitos: Ieee Computer Soc., 2008, p. 323–326.

WAYDA, Bryan. The blueprint redefined: new technological paradigms in architecture. **Yale Scientific**. Spring 2004.

WEEK, David. The structure of CAD and the structure of form. **Building and Environment**, v. 26, n. 1, p. 49–59, 1991.

WEN, Wen; LIU, Hong; WANG, Xia. Fractal geometry and architectural design. In: IEEE International Symposium on IT in Medicine Education, 2009, Beijing. **Proceedings...** Beijing: International Symposium on IT in Medicine Education, 2009.

WILLIAMS, K. Drawing, Form and Architecture: Two Projects for First-Year Students. **Nexus Network Journal**, v. 11, n. 1, p. 95–104, 1 abr. 2009.

WOODBURY, Robert. **Elements of parametric design**. London: Routledge, 2010.

YESSIOS, Chris I. A fractal studio. In: Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, 1987, Raleigh. **Proceedings...** Raleigh: ACADIA, 1987, p. 169–182.

ZAMENOPOULOS, Theodore; ALEXIOU, Katerina. Linking design and complexity: a review. In: JHONSON, Jeffrey; ZAMENOPOULOS, Theodore; ALEXIOU, Katerina. European Conference on Complex Systems, 2005, Paris. **Proceedings...** Paris: ECCS - Embracing Complexity in Design, 2005.

ZARNOWIECKA, Jadwiga. C. In search of new computer tools: what does Bovill really measure in architecture? Connecting the Real and the Virtual. In: 20<sup>th</sup> eCAADe, 2002, Warsaw. **Proceedings**. Warsaw: Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2002, p. 342–345.

\_\_\_\_\_. The Fractal Dimension of the regional architecture. In: Cyber-Real Design Conference, 1998, Bialystock. **Proceedings...** Bialystock: Cyber-Real Design Conference, 1998, p. 235–240.