

Pedro Oscar Pizzetti Mariano

**PROCESSO DE PROJETO PARAMÉTRICO DE ELEMENTOS  
DE FACHADA COM CARACTERÍSTICAS DA GEOMETRIA  
FRACTAL CONSIDERANDO SEU COMPORTAMENTO  
LUMÍNICO**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Projeto e Tecnologia do Ambiente Construído de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. PhD. Alice Theresinha Cybis Pereira

Florianópolis  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Mariano, Pedro Oscar Pizzetti  
Processo De Projeto Paramétrico De Elementos De  
Fachada Com Características Da Geometria Fractal  
Considerando Seu Comportamento Luminico / Pedro  
Oscar Pizzetti Mariano ; orientadora, Alice  
Theresinha Cybis Pereira, 2018.  
188 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis,  
2018.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Processo  
Paramétrico. 3. Geometria Fractal. 4. Elementos de  
Fachada. 5. Simulação. I. Pereira, Alice Theresinha  
Cybis. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.  
III. Título.

Pedro Oscar Pizzetti Mariano

**PROCESSO DE PROJETO PARAMÉTRICO DE ELEMENTOS  
DE FACHADA COM CARACTERÍSTICAS DA GEOMETRIA  
FRACTAL CONSIDERANDO SEU COMPORTAMENTO  
LUMÍNICO**

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do Título de “Mestre” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo na área de Projeto e Tecnologia do Ambiente Construído

Florianópolis, 30 de maio de 2018.

---

Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof.<sup>a</sup> Alice Theresinha Cybis Pereira, PhD.  
Orientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

---

Prof.<sup>a</sup> Carlos Eduardo Verzola Vaz, Dr. <sup>a</sup>  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

---

Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD.  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

---

Prof. Maria Gabriela Caffarena Celani, PhD.  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP  
(Videoconferência)



Este trabalho é dedicado aos meus pais,  
Rudimar e Jaqueline.



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus familiares, em especial meu pai Rudimar, minha mãe Jaqueline e minha irmã Poliana, por me aconselharem, acreditarem e me incentivarem a completar esta jornada.

A minha orientadora Alice Theresinha Cybis Pereira, pela oportunidade de formação no curso de mestrado, além de toda sua paciência, dedicação, confiança e interesse em suas orientações durante os últimos dois anos.

Aos membros da banca examinadora Carlos Eduardo Verzola Vaz, Fernando Oscar Ruttkay Pereira e Maria Gabriela Caffarena Celani, por sua disponibilidade em participar da avaliação deste trabalho.

Aos amigos e colegas, que me acompanharam nas mais diversas situações, ações e períodos durante esta trajetória. Em especial a Leandra Boldrini por me influenciar a iniciar este trabalho.

Ao laboratório Hiperlab/UFSC pelo espaço físico e equipamentos disponibilizados.

À CAPES pelo apoio financeiro concedido durante o período de Mestrado.

E ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PosArq e à UFSC pela oportunidade de cursar o mestrado.



“A felicidade está na atenção a um detalhe. Como se o resto se ausentasse para admitir a força de um instante perfeito”  
(Valter Hugo Mãe, 2016)



## RESUMO

Esta pesquisa parte do interesse no uso das características e regras dos fractais lineares e dos diferentes conhecimentos relacionados a aplicação desses padrões em projetos de elementos arquitetônicos considerando suas potencialidades lumínicas e compositivas. Este trabalho visa criar um processo paramétrico a fim de desenvolver, organizar e avaliar uma composição de elementos de fachada com características da geometria fractal, considerando o controle da iluminação natural e a complexidade de seu resultado final por meio da dimensão fractal.

Para isto, um traçado teórico e lógico foi desenvolvido através de um conjunto de conhecimentos que permitiram interpretar, utilizar e avaliar os padrões fractais por meio de simulações e verificações. Tais conhecimentos são identificados a seguir: o entendimento das características da geometria fractal; a aplicação destas características dentro da arquitetura e urbanismo; os softwares existentes para sua reprodução; os métodos para utilizar estes programas; e os conceitos e índices a respeito da iluminação natural.

Para o desenvolvimento do processo diferentes etapas foram construídas por meio de uma ferramenta paramétrica de programação visual e plugins, que permitiram a criação de etapas para a construção e avaliação das características fractais. Esta sequência de passos foi desenvolvida seguindo um modelo de *performance model* adaptado, e a sua construção por meio de um método da engenharia de software, o Modelo Iterativo Incremental.

Com o processo completo, foram identificados diferentes resultados que permitiram três conclusões a respeito do trabalho. O primeiro resultado é referente a identificação de uma sequência de ações visando à construção de processos paramétricos que envolvem a geometria fractal. O outro, diz respeito à relação entre o número de iterações que o fractal possui e sua respectiva dimensão fractal. Foram identificadas as habilidades necessárias para compreender e reproduzir um processo paramétrico semelhante. Ao final foram constatadas limitações ligadas a capacidade de hardware limitada dos computadores utilizados nesta pesquisa referente ao processo generativo. Também foram identificadas diferentes pesquisas que podem derivar do tema proposto e que utilizam dos elementos desenvolvidos ou da sequência de etapas do processo.

**Palavras-chave:** Processo Paramétrico. Geometria Fractal. Elementos de Fachada. Simulação.



## ABSTRACT

This research is based on the interest in the use of the characteristics and rules of linear fractals and of the different knowledge related to the application of these standards in architectural design projects considering their daylight and compositional potentialities. This work aims to create a parametric process in order to develop, organize and evaluate a composition of facade elements with characteristics of fractal geometry, considering the control of daylight and the complexity of its final result through the fractal dimension.

For this, a theoretical and logical tracing was developed through a set of knowledge that allowed to interpret, to use and to evaluate the fractal patterns through simulations and verifications. Such knowledge is identified as follows: the understanding of the characteristics of fractal geometry; the application of these characteristics within architecture and urbanism; the existing software for its reproduction; the methods for using these programs; and concepts and indexes regarding natural lighting.

For the development of the process different steps were built through a parametric visual programming tool and plug-ins, which allowed the creation of stages for the construction and evaluation of the fractal characteristics. This sequence of steps was developed following an adapted model performance model, and its construction by means of a software engineering method, the Incremental Iterative Model.

With the complete process, different results were identified that allowed three conclusions about the work. The first result refers to the identification of a sequence of actions aiming at the construction of parametric processes involving fractal geometry. The other relates to the relationship between the number of iterations that the fractal has and its respective fractal dimension. The skills needed to understand and replicate a similar parametric process have been identified. Finally, limitations related to the limited hardware capacity of the computers used in this research regarding the generative process were observed. We have also identified different researches that may derive from the proposed theme and that use the elements developed or the sequence of steps in the process.

**Keywords:** Parametric Process. Fractal Geometry. Facade elements. Simulation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Auto-similaridade na estrutura de um brócolis. ....	45
Figura 2 – Exemplo de auto-similaridade.....	46
Figura 3 – Exemplo de complexidade infinita.....	47
Figura 4 – Exemplo da dimensão fractal.....	48
Figura 5 – Exemplo da utilização do <i>box-counting</i> na curva de Koch.....	49
Figura 6 – <i>Box-counting</i> da Robie House.....	49
Figura 7 – Imagem composta pelas figuras do experimento. ....	52
Figura 8 – Comparação entre fractais Lineares e Não Lineares. 53	
Figura 9 – Fractal linear Curva de Peano. ....	54
Figura 10 – Fractal linear Ilha de Koch.....	55
Figura 11 – Fractal linear Curva de Dragão. ....	55
Figura 12 – Fractal linear Curva de Dragão de Hater-Heighway, na 16 iteração. ....	55
Figura 13 – Fractal linear Curva de Minkowski.....	56
Figura 14 – Fractal linear Conjunto de Cantor. ....	56
Figura 15 – Fractal linear Triângulo de Sierpinski.....	57
Figura 16 – Fractal linear Tapete de Sierpinski.....	57
Figura 17 – Fractal linear Quadrado de Gasket. ....	58
Figura 18 – Fractal linear <i>Jerusalem Cross</i> .....	58
Figura 19 – Fractal linear Dürer, pentagonal.....	59
Figura 20 – Fractal linear Dürer, hexagonal.....	59
Figura 21 – Fractal linear <i>Fractal Tree</i> . ....	59
Figura 22 – Iteração analisada nas colunas de Palladio.....	63
Figura 23 – Plantas de templos Hindus. ....	63
Figura 24 – <i>Jaggedness</i> nos limites horizontais do templo. ....	64
Figura 25 – <i>Jaggedness</i> nos limites verticais do templo. ....	64
Figura 26 – Auto-similaridade na ornamentação do templo Hindu. ....	65
.....	
Figura 27 – Vilarejo de <i>Ba-ili</i> .....	65
Figura 28 – Detalhes catedral gótica. ....	66
Figura 29 – <i>Castel del Monte</i> . ....	67
Figura 30 – Hotel projetado por Gaudi em Nova Iorque.....	68
Figura 31 – <i>Arkhitektions</i> de Kazimir Malevich.....	68
Figura 32 – <i>Venice Housing</i> , Peter Eisenman(1978).....	69
Figura 33 – <i>Moving Arrows, Eros and other Eros</i> , Peter Eisenman (1985).....	69
Figura 34 – <i>Federation Square</i> , Lab architectures. ....	71
Figura 35 – <i>PV, Parametric Variations</i> .....	74

Figura 36 – <i>PC, parametric combination</i> .....	75
Figura 37 – <i>Parametric hybrid models</i> .....	75
Figura 38 – <i>Rosler Attractors</i> . ....	78
Figura 39 – <i>NURBS</i> . ....	81
Figura 40 – Demonstração da interface do Grasshopper com o Rhinoceros 3D. ....	82
Figura 41 – Ação interface do Grasshopper com o Rhinoceros 3D. .....	82
Figura 42 – <i>Paper-based model</i> . ....	85
Figura 43 – <i>Performance model</i> . ....	85
Figura 44 - <i>CARS</i> . ....	94
Figura 45 – <i>Performance model</i> modificada. ....	99
Figura 46 – Estrutura básica do processo e sua sequência lógica. .....	101
Figura 47 – Processo completo do processo desenvolvido no Grasshopper, e suas quatro principais etapas. ....	103
Figura 48 – Estrutura completa do processo. ....	105
Figura 49 – Exemplo da modelagem topográfica.....	107
Figura 50 – Modelagem da superfície através dos pontos.....	108
Figura 51 – Curvas de nível e criação da superfície que as une. .....	108
Figura 52 – Controladores para as ruas, passeio, meio fio e cores ilustrativas. ....	109
Figura 53 – Exemplo de diferentes possibilidades de apropriação do lote. ....	110
Figura 54 – Controladores da infraestrutura para a divisão dos lotes.....	110
Figura 55 – Controlador individual para os parâmetros das construções .....	110
Figura 56 – Controlador para a seleção do lote.....	111
Figura 57 – Resultado da montagem do entorno paramétrico..	111
Figura 58 – Construção que receberá os elementos de fachada. .....	112
Figura 59 – Entorno na primeira etapa de testes. ....	112
Figura 60 – Entorno na segunda etapa de testes.....	112
Figura 61 – Controladores dos parâmetros da construção.....	113
Figura 62 – Regra para o fractal: <i>Square of Gasket</i> . ....	114
Figura 63 – Regra para o fractal: <i>Jerusalem Cross</i> . ....	114
Figura 64 – Regra para o fractal: Tapete de Sierpinski. ....	114
Figura 65 – Regra para o fractal: Conjunto de cantor. ....	115
Figura 66 – Regra para o fractal: Triângulo de Sierpinski. ....	115

Figura 67 – Regra para o fractal: Curva de Minkowski. ....	115
Figura 68 – Regra para o fractal: Curva de Peano.....	115
Figura 69 – Regra para o fractal: Curva de Dragão.....	115
Figura 70 – Regra para o fractal: <i>Fractal Tree</i> .....	116
Figura 71 – Regra para o fractal: Ilha de Koch.....	116
Figura 72 – Processo para a curva de Minkowski no Grasshopper. .....	117
Figura 73 – Painéis com o <i>Square of Gasket</i> , com percentagem da área vazada para cada iteração. ....	117
Figura 74 – Painéis com o <i>Jerusalem Cross Gasket</i> , com percentagem da área vazada para cada iteração.....	117
Figura 75 – Painéis com o Tapete de Sierpinski, com percentagem da área vazada para cada iteração.....	117
Figura 76 – Painéis com o Conjunto de cantor, com percentagem da área vazada para cada iteração.....	118
Figura 77 – Painéis com o Triângulo de Sierpinski, com percentagem da área vazada para cada iteração.....	118
Figura 78 – Painéis com o Curva de Minkowski, com percentagem da área vazada para cada iteração.....	118
Figura 79 – Painéis com o Curva de Peano, com percentagem da área vazada para cada iteração. ....	118
Figura 80 – Painéis com o Curva de Dragão, com percentagem da área vazada para cada iteração. ....	119
Figura 81 – Painéis com o <i>Fractal Tree</i> , com percentagem da área vazada para cada iteração.....	119
Figura 82 – Painéis com o Ilha de Koch, , com percentagem da área vazada para cada iteração. ....	119
Figura 83 – Parte do processo para a simulação dos painéis. ...	120
Figura 84 – Ambiente de simulação dos painéis. ....	120
Figura 85 –Resultados do SDAs, UDI e ASE da Curva de Minkowski (Norte e Sul) para cada iteração.....	122
Figura 86 – Resultado os tipos de fractais conforme a iteração (Norte). ....	122
Figura 87 – Resultado os tipos de fractais conforme a iteração (Sul).....	122
Figura 88 – Resultados gerais para o UDI, (Norte). ....	123
Figura 89 –Processo que cria as prateleiras para o Curva de Minkowski.....	125
Figura 90 –Processo que cria as prateleiras para o Curva de Minkowski.....	125

Figura 91 – Diferentes vistas das possíveis modificações da espessura do elemento de fachada (ângulo de abertura fechado ou aberto e espessura prolongada ou curta). .....	126
Figura 92 – Exemplo de modificações nas espessuras dos elementos. ....	126
Figura 93 – Processo da numeralização para o Galápagos.....	128
Figura 94 – Parte do processo para a otimização com o Galápagos. ....	128
.....	
Figura 95 – Parte do processo que compõe a divisão da fachada. ....	130
.....	
Figura 96 – Resultado da divisão das fachadas. ....	130
Figura 97 – Parte do processo que organiza os elementos. ....	131
Figura 98 – Parte do processo que preenche a divisão da fachada. ....	132
.....	
Figura 99 – Resultado da sequência de preenchimento.....	132
Figura 100 – Controladores para os intervalos que posicionam os painéis. ....	133
Figura 101 – Diferentes composições criadas por meio dos controladores I. ....	133
Figura 102 – Diferentes composições criadas por meio dos controladores I. ....	134
Figura 103 – Parte do processo que promove a simulação.....	136
Figura 104 – Resultado dos componentes que permitem visualizar as geometrias utilizadas nas simulações .....	136
Figura 105 – Local ( <i>panel</i> ) dos resultados do UDI. ....	137
Figura 106 – Projecção das curvas para a leitura do <i>box-counting</i> . ....	138
.....	
Figura 107 – Primeira contagem do <i>Box-counting</i> . ....	138
Figura 108 – Segunda contagem do <i>Box-counting</i> . ....	138
Figura 109 – Terceira contagem do <i>Box-counting</i> . ....	139
Figura 110 – Processo para o <i>box-counting</i> . ....	139
Figura 111 – Localização do quadro com o resultado do <i>box-counting</i> . ....	139
Figura 112 – Sequência de passos para validação do processo. ....	140
Figura 113 – Altura do entorno para a primeira e segunda sequência de testes do processo. ....	141
Figura 114 – Composição feita com o Tapete de Sierpinski. ....	143
Figura 115 – Composição feita com o Conjunto de Cantor. ....	143
Figura 116 – Composição feita com o Curva de Minkoski. ....	143
Figura 117 – Composição feita com o Curva de Dragão. ....	144

Figura 118 – Resultado UDI para o Conjunto de Cantor no 1º pavimento para um entorno provido de luz natural seguido do resultado deste mesmo fractal para um entorno alto com relevo acidentado.....	147
Figura 119 – Resultado UDI para o Conjunto de Cantor no 2º pavimento para um entorno provido de luz natural seguido do resultado deste mesmo fractal para um entorno alto com relevo acidentado.....	148
Figura 120 – Resultado UDI para o Conjunto de Cantor no 3º pavimento para um entorno provido de luz natural seguido do resultado deste mesmo fractal para um entorno alto com relevo acidentado.....	148
Figura 121 – Resultado UDI para o Conjunto de Cantor no 3º pavimento para um entorno provido de luz natural seguido do resultado deste mesmo fractal para um entorno alto com relevo acidentado.....	148
Figura 122 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de janeiro.....	149
Figura 123 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de fevereiro.....	149
Figura 124 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de março.....	149
Figura 125 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de abril.....	150
Figura 126 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de maio.....	150
Figura 127 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de junho.....	150
Figura 128 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de julho.....	150
Figura 129 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de agosto.....	151
Figura 130 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de setembro.....	151
Figura 131 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de outubro.....	151
Figura 132 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de novembro.....	151
Figura 133 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de dezembro.....	152
Figura 134 – Comparação entre as composições com entorno baixo e alto para o primeiro elemento do conjunto de cantor.....	153
Figura 135 – Comparação entre as composições com entorno baixo e alto para o primeiro elemento do conjunto de cantor.....	153

Figura 136 – Comparação entre as composições com entorno baixo e alto para a primeira iteração (segundo elemento) do conjunto de cantor.	153
Figura 137 – Comparação entre as composições com entorno baixo e alto para a segunda iteração (terceiro elemento) do conjunto de cantor.	154
Figura 138 – Comparação entre as composições com entorno baixo e alto para a terceira iteração (quarto elemento) do conjunto de cantor.	154
Figura 139 – Comparação entre as composições com entorno baixo e alto para a quarta iteração (quinto elemento) do conjunto de cantor.	154
Figura 140 – Humanização da composição para entorno baixa e alto.	155
Figura 141 – Parametros utilizados durante as diferentes etapas do processo	179
Figura 142 – Diferentes etapas que compõem a programação visual.	180
Figura 143 – Gráficos com os resultados das diferentes simulações dinâmicas feitas na pesquisa I.	181
Figura 144 – Gráficos com os resultados das diferentes simulações dinâmicas feitas na pesquisa II.	182
Figura 145 – Resultado do Galápagos para os diferentes tipos de fractais e iterações.	183
Figura 146 – Resultados das adições de elementos (espessura) sombreadores nos paineis fractais.	184
Figura 147 – Resultados para o UDI nos diferentes pavimentos fractais.	184
Figura 148 – Parte do processo que compreende a construção da etapa descrita como ambiente.	185
Figura 149 – Parte do processo que compreende a construção da etapa descrita como escolha.	186
Figura 150 – Parte do processo que compreende a construção da etapa descrita como organização.	187
Figura 151 – Parte do processo que compreende a construção da etapa descrita como simulação.	188

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Revisão sistemática (fonte de pesquisa e quantidade parcial e total de trabalhos encontrados). .....	39
Tabela 2 – Critérios utilizados na filtragem e quantidade total de trabalhos. ....	39
Tabela 3 – Critérios utilizados na filtragem e quantidade total de trabalhos selecionados nas buscas manuais.....	41
Tabela 4 – Exemplos de elementos naturais e suas dimensões D. ....	50
Tabela 5 – Diferentes programas de simulação e seus usos. ....	95
Tabela 6 – Resultado da otimização dos painéis. ....	129
Tabela 7 – Resultados da dimensão fractal.....	142
Tabela 8 – Intervalo dos valores de radiação para a organização dos painéis para o entorno com baixo número de pavimentos .....	145
Tabela 9 – Resultados UDI médio para cada andar e tipo de fractal. ....	145
Tabela 10 – Intervalo de valores para a organização dos painéis, para um entorno com edifícios com mais pavimentos e relevo acidentado (2º teste).....	146
Tabela 11 – Resultado do UDI com novo intervalo de valores para a composição dos elementos de fachada para um entorno alto e relevo acidentado. ....	147
Tabela 12 – Resultados UDIs, (entorno baixo e alto).....	152
Tabela 13 – Parâmetros avançados de configuração de radiação utilizados nos parâmetros do componente DIVA.....	179



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Aa – Ambient Accuracy  
Ab – Ambient Bounces  
Ag – Algoritmo genético  
Ar – Ambient Resolution  
ASE - Anual sunlight exposure  
AEC - Architecture, Engineering and Construction  
CAD – Computer Aided Design  
CARS – Coeficiente de admissão da radiação solar  
BREEAM - BRE Environmental Assesment Method  
CAAD – Computer Aided Architecture Design  
DAYSIM - Advanced daylight simulation software  
DIVA - Design Iterate Validate Adapt  
Df – Daylight Factor  
Dr – Direct Relays  
Ds – Direct Sampling  
GenPOD - Generative performance oriented design model  
IES - Illuminating Engineering Society  
IFS - Iterated function system  
IPO – Input process and output  
LEED - Leadership in Energy and Environmental Desing  
Lr – Limit Reflection  
Lw – Limit Weight  
MII – Modelo Interativo Incremental  
NURBS - Non Uniform Rational Basis Spline  
SDA - Spacial daylight autonomy  
St – Specular Threshold  
SDK - Software development kit  
UDI- useful daylight illuminance  
VPL - Visual programming languages



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>29</b>
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA .....	33
1.2	OBJETIVOS .....	33
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>33</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>33</b>
1.3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	34
<b>1.4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA</b> .....	<b>34</b>
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	35
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>37</b>
2.1	REVISÃO INTEGRATIVA .....	37
<b>2.1.1</b>	<b>Revisão Sistemática</b> .....	<b>37</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Revisão Manual</b> .....	<b>40</b>
2.2	GEOMETRIA FRACTAL .....	41
<b>2.2.1</b>	<b>Padrões geométricos</b> .....	<b>41</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Características Fractais</b> .....	<b>44</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Dimensão Fractal</b> .....	<b>47</b>
<b>2.2.4</b>	<b>A geometria fractal e a redução do stress</b> .....	<b>50</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Fractais Lineares e Não Lineares</b> .....	<b>53</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Padrões Fractais Iterados</b> .....	<b>53</b>
2.2.6.1	Fractais de Fronteira .....	54
1.1.1.1	Fractais por Remoção .....	56
2.2.6.2	Fractais Dürer .....	58
2.2.6.3	Fractais tipo árvore .....	59
2.3	A GEOMETRIA FRACTAL NA ARQUITETURA .....	60
<b>2.3.1</b>	<b>Modelos para aplicação dos fractais na arquitetura</b> .....	<b>60</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Utilização da geometria fractal na arquitetura</b> .....	<b>62</b>
2.4	FERRAMENTAS PARA APLICAÇÃO DA GEOMETRIA FRACTAL .....	72

<b>2.4.1</b>	<b>Processos Paramétricos .....</b>	<b>73</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Processos Generativas .....</b>	<b>76</b>
<b>2.4.3</b>	<b>I.F.S (<i>iterated function system</i>) .....</b>	<b>77</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Softwares .....</b>	<b>79</b>
2.4.4.1	Rhinoceros 3D e Grasshopper .....	80
2.5	MODELO PARA A CONSTRUÇÃO DO PROCESSO PARAMÉTRICO.....	83
<b>2.5.1</b>	<b>Digital Design Thinking.....</b>	<b>83</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Performance Model .....</b>	<b>84</b>
<b>2.5.3</b>	<b>M.I.I (Modelo Interativo Incremental) .....</b>	<b>86</b>
2.6	COMPORTAMENTO LUMÍNICO E SIMULAÇÕES .....	88
<b>2.6.1</b>	<b>Elementos de Fachada .....</b>	<b>89</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Simulações dinâmicas .....</b>	<b>90</b>
<b>2.6.3</b>	<b>Índices lumínicos.....</b>	<b>91</b>
2.6.3.1	Spacial Daylight Autonomy.....	91
2.6.3.2	Anual Sunlight Exposure.....	92
2.6.3.3	Useful Daylight Illuminance.....	92
2.6.3.4	Coefficiente de admissão da Radiação Solar Incidente.....	93
<b>2.6.4</b>	<b>Software de Simulação .....</b>	<b>94</b>
2.6.4.1	DIVA .....	95
2.6.4.2	Parâmetros do DIVA .....	96
2.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	96
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTO METODOLÓGICO E</b>	
	<b>RESULTADOS DO PROCESSO .....</b>	<b>99</b>
3.1	ESTRUTURA DO PROCESSO .....	100
3.2	DESENVOLVIMENTO DE UM AMBIENTE PARAMETRICAMENTE MODIFICÁVEL.....	106
<b>3.2.1</b>	<b>Montagem do Entorno Urbano Parametrizado .....</b>	<b>106</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Modelagem do Edifício .....</b>	<b>111</b>

3.3	DESENVOLVIMENTO E ESCOLHA DOS ELEMENTOS DE FACHADA .....	113
3.3.1	<i>Design</i> dos Elementos com as Características da Geometria Fractal	113
3.3.2	Seleção dos Painéis .....	119
3.3.3	Otimização dos Painéis .....	124
3.4	ORGANIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DE FACHADA ...	129
3.4.1	Divisão e Organização da Fachada.....	129
3.4.2	Ajuste dos Elementos de Fachada.....	133
3.5	VERIFICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO .....	134
3.5.1	Verificação do Comportamento da Iluminação Interna	135
3.5.2	Verificação da Dimensão Fractal.....	137
3.5.3	Sequência de Passos para Verificação da Composição..	140
3.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	141
3.6.1	Resultados da Dimensão Fractal na Sequencia de Verificação do Processo .....	142
3.6.2	Resultados do Comportamento Lumínico na Sequência de Verificação do Processo .....	144
3.6.3	Comparações dos Resultados da Sequência de Verificação do Processo.....	146
4	CONCLUSÕES .....	157
4.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	159
4.2	TRABALHOS FUTUROS.....	160
5	REFERÊNCIAS .....	163
6	APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DOS ELEMENTOS DE FACHADA .....	179
7	APÊNDICE B – ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES.....	184
8	APÊNDICE C – PROGRAMAÇÃO VISUAL DO PROCESSO .....	185



## 1 INTRODUÇÃO

Processos paramétricos têm potencial para abranger conceitos e partidos inovadores alavancados pelo uso de modelagem e simulação. Estes caminhos, dentro da confecção do projeto, propiciam a inserção de padrões e regras geométricas, permitindo que seus consequentes resultados sejam verificados por meio de simulações, que validam suas características e proporcionam ao projetista o envolvimento em diferentes detalhes e escalas. Estes meios de projetar permitem que a resposta para um problema arquitetônico seja trabalhada de modo aprofundado, trazendo retornos positivos para a percepção humana, para a ergonomia e na relação do projeto para com a cidade. (MENGES, 2012; MONTENEGRO, 1991)

Criações meramente abstratas podem constituir um equívoco na busca pela satisfação psicológica humana. Uma vez que, o objetivo central da arquitetura é adaptar o design a fim de criar um projeto para o Homem de acordo com os princípios da ergonomia física, necessidades sensoriais e psicológicas, além das necessidades funcionais, orçamentárias, legislativas e ambientais. A inserção de formas simples e a substituição de padrões tradicionais complexos, pode ser atribuído a um conceito denominado fundamentalismo geométrico, modelo que surgiu durante o período moderno. (SALINGAROS, MEHAFFY, 2007; SALINGAROS, 2003).

Gradativamente pode-se notar a pouca conexão entre os valores tradicionais da cidade e suas atuais construções. As geometrias e formas complexas foram sendo substituídas por formas sólidas e simples derivadas do modernismo, fazendo com que o significado e o valor histórico que ligavam a edificação às emoções dos indivíduos se perdesse. Ao desprezar as escalas menores do projeto, o ser humano é transformado em um indivíduo com pouca identidade cultural, tendo sua utilidade, neste caso, reduzida a ocupação do edifício. Por deixarem de treinar a abstração do olhar nas pequenas escalas, acabam perdendo a interpretação da complexidade e a compreensão de que a abstração pode imitar a realidade. (SALINGAROS, MEHAFFY, 2007; SALINGAROS, 2003).

Uma oportunidade para reaproximar a construção, a estrutura e a geometria com a ornamentação e a escala do usuário, é a utilização de características da natureza e da biologia durante o processo de projeto. Uma amostra deste tipo de conexão entre a geometria, a matemática, a tecnologia e a natureza está na utilização de componentes e regras fractais por meio de programas computacionais, que permitem transformar estes

padrões em ornamentos e partidos arquitetônicos. (SALINGAROS, MEHAFFY, 2007; SALINGAROS, 2003).

Uma das possibilidades para a inserção dos padrões fractais é a utilização do *design* computacional, que permitiu mudanças no modo como a arquitetura é concebida. Para Menges (2012), várias disciplinas que fazem parte do processo da produção arquitetônica estão se transformando, incorporadas em um cenário de rápidas mudanças, no qual a busca por soluções caminha dentro do *design*. Para Hernandez (2006) com o desenvolvimento do CAD (*computer aided design*) e CAAD (*computer aided architecture design*) arquitetos vêm explorando as potencialidades da utilização das ferramentas provenientes dos suportes digitais, tornando menos trabalhosas as variações e as mudanças decorrentes do processo de criação.

Hernandes (2004) e Salim e Burry (2010) comentam que antes da iniciação das ferramentas digitais no campo do desenvolvimento de projeto e construção, AEC (*architecture, engineering and construction*), o processo potencializado pelo uso de software no desenvolvimento de projetos já era utilizado pela indústria da construção aeroespacial. O uso que inicialmente era exclusivo de empresas aeroespaciais, náuticas e automobilísticas, atualmente auxilia arquitetos no desenho e na modelagem dos projetos, evitando que os modelos em construção sejam reestruturados repetidas vezes.

Para Celani e Vaz (2012), o surgimento, a expansão e a utilização de softwares paramétricos e generativos na Arquitetura e Urbanismo ocorreram após a década de 1980, com a atualização da capacidade de hardware dos computadores. O emprego destes softwares requer inúmeras repetições e iterações, impossibilitando ou dificultando a execução em hardwares não capacitados ou com ferramentas manuais. Com o advento de novos computadores, processadores, memórias e preços mais acessíveis, as ferramentas e o modo como elas são operadas começaram a se expandir, sofrendo modificações e melhorias. Rashad e Alfari (2010), descrevem que as simulações resultantes destes softwares paramétricos e generativos podem proporcionar respostas quantitativas e qualitativas sobre o desenho final da construção. As interpretações quantitativas referem-se a aspectos econômicos, tais como custo inicial e potenciais lucros, por exemplo. E qualitativas, por meio dos resultados das simulações e análises de valores energéticos, lumínicos, térmicos, acústicos, estruturais, entre outros.

Rashad e Alfari (2010), afirmam que na busca por desenvolver construções sustentáveis diversos parâmetros devem ser analisados, como custo, funcionalidade e gastos energéticos. Necessitando, em muitos

casos, da formação de uma equipe multidisciplinar para colaborar na proposta e avaliar parâmetros, de modo a conceber uma proposta que atenda as melhores performances. Um exemplo disto é a ‘*Generative Performance Based Design Methodology*’, em que inúmeras variações de parâmetros são alterados em um modelo, gerando diferentes composições que são analisadas por um sistema ou simulações que selecionam as principais propostas.

Osama, Sherif e Ezzeldin (2014), relatam que estes conhecimentos possibilitam a aplicação destas ferramentas para interpretar e copiar as formas complexas da natureza, por meio das características dos fractais. As propriedades desta geometria estão sendo utilizadas por arquitetos e designers, principalmente para desenvolver elementos estéticos e decorativos para fachada, criando assim uma “pele” para a construção.

Com o aumento das áreas envidraçadas nas construções, os elementos de controle solar possuem um papel fundamental nas edificações, destacando-se em locais onde é necessária uma admissão seletiva da luz solar. Assim, ferramentas e softwares que auxiliam no desenvolvimento de modelos paramétricos, que permitem alterações na busca de melhor performance e que geram pré-visualizações dos resultados, estão se tornando progressivamente importantes nas tomadas de decisões de projeto. (CARTANA, PEREIRA e BERTE, 2016).

Para Emami, Khodadadi e Von Buelow (2014), a luz natural é de suma importância ao pensar nos elementos que revestem a construção. Entretanto, suas potencialidades aparecem cercadas de características que podem criar aspectos negativos na construção, como o desconforto térmico e o glare. Alshoubaki et al. (2016) comentam que a luz apresenta fundamental importância no projeto arquitetônico, pois ajuda a interpretar a edificação, dimensionar as aberturas e auxilia na diminuição do uso de energia elétrica, por exemplo. A sua utilização implica em estudos desde as primeiras etapas da confecção do projeto, como na escolha do terreno, desenvolvimento da forma, tamanho das aberturas e direcionamento das fachadas.

O emprego de diferentes respostas tecnológicas nas fachadas das construções é a primeira forma de ação responsável pela performance do edifício, e de sua otimização na redução da energia elétrica. Porque a fachada é o componente de interface entre o meio externo e interno da construção, funcionando como um elemento moderador destes dois ambientes. Assim, as diferentes características inseridas neste componente, como geometria, materiais e tecnologia podem influenciar não só aspectos lumínicos, mas também outros como a qualidade do ar, a

temperatura, a humidade, os níveis sonoros, a noção de tempo, etc. (MALIK, 2017).

A utilização de recentes ferramentas e métodos influenciam diversos profissionais em inúmeras situações de projeto, possibilitando, entre outros aspectos, o desenvolvimento de elementos de proteção solar com desenhos diferenciados e partidos formais abstratos e complexos. Para Riam e Asayama (2016), em determinados casos, estes conceitos e partidos se inspiram na natureza para desenvolver suas formas e estruturas. Contudo, recriar formas complexas que a natureza apresenta, pode se tornar uma tarefa difícil caso sejam aplicadas formas e métodos euclidianos. O emprego da geometria fractal ou de suas características, aliado ao uso de algoritmos, pode ajudar na criação e desenvolvimento de conceitos e formas complexas.

Para Langhein (2005), nossa capacidade de discernimento das composições esteticamente agradáveis é formada a partir de figuras que possuem padrões desenvolvidos por princípios matemáticos, como simetria, modulação, topologia, etc. As proporções que determinam nossa percepção do belo podem ser definidas por diversos movimentos, controles e variações, que por sua vez, permitem interpretar a sensação de um determinado objeto ou conjunto. Ching (2013) descreve que existem princípios arquitetônicos que podem ser inseridos dentro da forma, espaço e função, que indicam um padrão e uma ordem na construção. Estas movimentações e apropriações fazem com que um elemento do conjunto seja parte de um todo, tendo sua disposição pautada nas outras partes, criando harmonia e diálogo por meio da distribuição em um eixo, simetria, hierarquia, ritmo, repetição, transformação, entre outros.

Pode-se constatar que as descrições de Ching (2013) e Langhein (2005) sobre a composição de padrões e qualidades na arquitetura são similares ao pensamento da composição ou ao princípio da arquitetura orgânica descrita por Harris (2007). Neste princípio, uma parte pode influenciar o comportamento de toda uma estrutura e sua organização. Esta forma de criar e compor os espaços é semelhante a uma das características de desenvolvimento dos fractais, a auto-similaridade, descrita por Mandelbrot (1977).

A possibilidade de gerar padrões, estabelecer parâmetros e regras, também influenciou diretamente a composição e os estudos envolvendo a geometria fractal. Mandelbrot (2004) afirma que as teorias a respeito da geometria fractal inspiraram largamente a concepção da arquitetura do século XX e do design generativo, pois a composição dos fractais demanda de processos sistemáticos. Riam e Asayama (2016) comentam que o emprego de estratégias que não utilizem de matemática ou design

computacional podem confundir a interpretação e a utilização da geometria fractal.

Diante destes conceitos, este trabalho investiga processos paramétricos que aliem diferentes partes de cada uma destas premissas. A fim de desenvolver, organizar e avaliar uma composição de elementos de fachada com características da geometria fractal, almejando desenvolver composições com um determinado nível de complexidade, assim como verificar a consequente distribuição da luz natural no seu ambiente interno.

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Como um processo paramétrico pode ser confeccionado a fim de desenvolver e organizar elementos de fachada, que utilizem das características da geometria fractal, por meio de sua dimensão fractal e consequente comportamento lumínico natural interno?

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Criar um processo paramétrico que utilize as características da geometria fractal para o projeto e organização de elementos de fachada, levando em consideração o comportamento lumínico natural interno e a dimensão fractal.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenhar um traçado teórico que apoie a idealização do processo paramétrico para a criação e organização de elementos de fachada considerando características da geometria fractal, modelos de comportamento da luz natural, assim como ferramentas e métodos para modelagem paramétrica.
- Desenvolver um ambiente paramétrico cabível de simular diferentes entornos e que seja detentor de uma construção também paramétrica que admita a inserção de elementos de fachada.
- Criar, escolher e otimizar por meio de alterações e simulações, elementos de fachada que possuam seus

conceitos baseados nas características da geometria fractal.

- Compor estes diferentes elementos de fachada em ambiente paramétrico, de modo que os mesmos se organizem por meio da radiação consequente do entorno escolhido.
- Simular, avaliar e recompor os painéis fractais na fachada por meio do comportamento da luz natural interna e sua respectiva dimensão fractal.

### 1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa tem por objetivo o desenvolvimento de um processo paramétrico que possibilite a formação, a composição e a avaliação de elementos de fachada com características da geometria fractal. Para cumprir com este objetivo, propõe-se uma série de ações para ampliar os conhecimentos do tema, adquirir as habilidades para manipular as ferramentas, e interpretar seus resultados.

Inicialmente, busca-se desenvolver uma revisão integrativa com o intuito de consolidar o tema proposto, identificando diferentes temáticas para a compreensão do processo como: características fractais; software; simulações; e comportamento lumínico. A fim de compreender os diversos assuntos que envolvem a pesquisa e manipular os softwares necessários.

Na sequência, pretende-se desenvolver diferentes etapas do processo paramétrico através de uma plataforma de programação visual. Almeja-se que as etapas desenvolvidas para o processo respondam aos objetivos da pesquisa, construindo uma sequência de estágios que juntos compõem o processo completo.

Vislumbra-se que o ambiente virtual parametrizado possa remodelar diferentes alterações na composição, no entorno e em outras características. Permitindo, assim, comparar os resultados dos arranjos dos painéis, e validar o processo através de simulações que avaliam o comportamento lumínico, resultante da composição dos painéis, e o padrão fractal que caracteriza a organização.

### 1.4 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

O trabalho apresenta dois procedimentos metodológicos, caracterizando-se como uma pesquisa exploratória e descritiva, por meio de resultados qualitativos. A pesquisa pode ser considerada exploratória

por detalhar um processo que utiliza e avalia a geometria fractal como elemento de criação e organização de protetores solares. O desenvolver do processo trouxe à tona diferentes etapas, as quais serão posteriormente identificadas, que demonstraram ser essenciais para a construção de um método que possibilitasse criar, compor e avaliar o uso das características da geometria fractal.

O caráter descritivo da pesquisa, surge por meio da definição das diferentes etapas e lógicas utilizadas durante a confecção do processo. Estes passos, ferramentas e meios foram descritos de modo a orientar os demais pesquisadores e profissionais no entendimento do processo de projeto, possibilitando a aplicação de tal procedimento em diferentes situações.

Ao final do processo, busca-se obter resultados quantitativos a respeito do comportamento da luz natural e da dimensão fractal. O primeiro, pela aplicação de simulações dinâmicas dentro do ambiente, permitindo avaliar um índice que possibilita identificar o comportamento da luz natural. E o segundo, visando demonstrar a dimensão fractal resultante da composição dos painéis. Com estes dois resultados quantitativos, busca-se avaliar a funcionalidade do processo paramétrico completo.

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A pesquisa se estrutura em cinco capítulos principais, Introdução, Revisão da Literatura, Procedimentos Metodológicos, Resultados e Conclusões. O primeiro capítulo (**Introdução**) apresenta de forma sucinta alguns dos temas tratados no trabalho, abordando as diferentes temáticas pesquisadas para desenvolver o processo paramétrico, além de apresentar o problema de pesquisa e os objetivos pertinentes à obtenção do resultado.

O segundo capítulo (**Revisão da Literatura**) descreve o modo como foram obtidas as diferentes referências bibliográficas e detalha os conceitos pertinentes à construção do processo paramétrico. Esta parte do trabalho apresenta a revisão integrativa, os conceitos da geometria fractal, a inserção dessa geometria na arquitetura, as ferramentas cabíveis de gerá-la, os modelos que podem ser utilizados para a aplicação dessas ferramentas. Além de algumas das características, software e índices relativos à avaliação da iluminação natural.

O terceiro capítulo (**Procedimentos Metodológicos**) concentra-se no método para o desenvolvimento do processo paramétrico em quatro partes, Ambiente, Escolha, Organização e Verificação. Cada uma dessas

etapas é descrita e ampliada, demonstrando as diversas escalas e estágios que compõe o processo como um todo.

O quarto capítulo (**Resultados**) apresenta o processo completo, com suas quatro etapas, além de um teste para a verificação do seu funcionamento. Nesta validação são apresentados e comparados dois resultados diferentes provenientes do processo paramétrico.

No quinto e último capítulo (**Conclusões**) são demonstradas a análise e a verificação feita por meio dos diferentes resultados do processo paramétrico, as considerações finais provenientes da pesquisa e os possíveis trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma sequência de temas importantes para o entendimento da pesquisa. Os assuntos foram divididos em seis subcapítulos, nos quais são explorados os conhecimentos necessários para o desenvolvimento do processo paramétrico capaz de criar, organizar e avaliar os elementos de fachada com características da geometria fractal. Os subcapítulos são descritos como: revisão bibliográfica integrativa; características que compõem as regras da geometria fractal; utilização dos padrões fractais na arquitetura; ferramentas cabíveis de gerar as regras da geometria; método utilizado para o emprego da ferramenta; e simulações utilizadas para avaliar o comportamento lumínico dos painéis.

### 2.1 REVISÃO INTEGRATIVA

Esta seção do capítulo descreve a revisão integrativa utilizada para estruturar o corpo teórico dos diferentes temas abordados na pesquisa. Posteriormente, nas demais seções deste capítulo, serão descritos os assuntos que auxiliaram na construção do processo, retratando os principais conhecimentos de cada tema.

Whittemore e Knafl (2005) descrevem a revisão integrativa como um método que resume e compreende determinado fenômeno ou problema de pesquisa, por meio de uma revisão bibliográfica que combina diferentes métodos potencializando o alcance da pesquisa. Souza, Silva e Carvalho (2010) afirmam que o uso da revisão integrativa permite ampliar o panorama sobre determinados assuntos a partir de conhecimentos multidisciplinares. E Botelho, Cunha e Macedo (2011) comentam que a utilização deste tipo de revisão bibliográfica é o primeiro degrau para a construção do conhecimento científico, pois permite o reconhecimento de diferentes lacunas em determinados assuntos.

O presente trabalho utilizou dois métodos para compor sua revisão integrativa: a revisão sistemática e a revisão manual. O primeiro artifício foi direcionado para a busca de fontes relacionadas com o problema de pesquisa. E o segundo, para complementar informações pertinentes às etapas iniciais, aprofundando diferentes conteúdos, e posteriormente, complementando informações.

#### 2.1.1 Revisão Sistemática

O primeiro método utilizado na revisão integrativa foi a revisão sistemática. Para Rother (2007) este procedimento seleciona, de maneira

planejada e sistematizada, as fontes bibliográficas adequadas para responder ao problema de pesquisa, localizando estudos, avaliando criticamente seus conteúdos e realizando a coleta e análise dos trabalhos localizados. Gil (2002) comenta também que a imersão sistemática na literatura proporciona um contato direto com o problema elaborado, pois implica em um aprofundamento de conteúdo com a consulta de diversos documentos.

A revisão sistemática iniciou com a localização de estudos referentes ao problema de pesquisa proposto. Estas buscas procuravam por palavras-chave, que eram escolhidas por sua conexão com o tema, localizando, assim, estudos que auxiliassem na criação de um processo paramétrico. Tais palavras foram selecionadas através da leitura de trabalhos que apresentavam conteúdos relevantes a respeito do problema de pesquisa, estudos como os de Sedrez (2009) e Sedrez (2016).

A primeira busca ocorreu durante os meses de julho e agosto de 2016 utilizando quatro palavras-chave: **arquitetura fractal**, (*fractal architecture*); **fachada fractal**, (*fractal facade*); **geometria fractal**, (*fractal geometry*); **sistemas paramétricos**, (*parametric systems*). Buscadas em português e inglês, entre aspas, de forma isolada ou em combinações com outras palavras como: luz do dia (*daylight*); elementos de fachada, (*facade elements*); sistemas generativos (*generative systems*); entre outras. Estes vocábulos foram pesquisados em periódicos científicos como: *Design Studies*, *Automation in Constructions*, e em bases de dados como: *Scopus*; *Google Academic*; Periódico Capes; *Jstor*. Outros repositórios e bases de dados também foram consideradas como: *Architect Design Magazine*; *Multi Science*; *Environment and Planning B*; *Web of Science*. Contudo, os resultados encontrados a partir das palavras-chave não foram relevantes. Assim, estes dados foram utilizados novamente com outros temas durante as buscas manuais.

Para aprimorar as buscas optou-se pelo uso de combinações de conectores (*strings*) entre as palavras-chave escolhidas. As combinações foram feitas ligando as palavras entre aspas com *or* ou *and*, gerando resultados como: “*fractal architecture*” OR “*fractal facade*” AND “*generative systems*”; “arquitetura fractal” ou “geometria fractal” e “iluminação”; “*fractal architecture*” AND “*facade elements*”.

As buscas utilizaram filtros avançados, selecionando artigos com até cinco anos, podendo ampliar esta faixa para dez anos, caso os resultados não fossem satisfatórios. Foram exibidos de vinte a vinte e cinco artigos por página, resultando, em média, cento e cinquenta trabalhos por banco de dados ou revistas.

Nesta primeira parte da revisão foram selecionados 87 trabalhos a partir da leitura de seus resumos e da avaliação de pertinência e relação com o tema. Os artigos, dissertações e teses encontrados foram analisados e filtrados por meio de critérios de seleção. Na sequência, a tabela 1 demonstra a quantidade de trabalhos encontrados a partir das palavras-chave e as bases de dados utilizadas.

Tabela 1 – Revisão sistemática (fonte de pesquisa e quantidade parcial e total de trabalhos encontrados).

Palavras	Design Studies	Aut. in Constr	Scopus	Google Academic	Per. Capes	Jstor	TOTAL
Arquitetura fractal	X	5	12	9	3	5	34
Fachada fractal	1	2	3	7	5	4	22
Geometria fractal	3	2	7	4	X	7	23
Sistemas paramétricos	X	X	4	4	X	X	8
<b>TOTAL</b>	4	9	26	24	8	16	87

Fonte: O autor.

Para os 87 trabalhos foram delimitados dois critérios, o primeiro foi eliminar as pesquisas que possuíam duplicidade, pois como a pesquisa aconteceu em diferentes repositórios, com bancos de dados em comum, alguns dos trabalhos foram encontrados repetidamente, sendo excluídos doze artigos duplicados. O outro critério foi excluir textos que não possuísem nenhuma informação relevante sobre o tema proposto, mesmo apresentando título e resumo condizentes. Esta seleção foi feita por meio da leitura do capítulo introdutório de cada trabalho, resultando em um total de 62 trabalhos com conteúdos pertinentes para alguma etapa da construção do processo paramétrico. A tabela 2 apresenta um resumo dos critérios de seleção utilizados na filtragem dos trabalhos.

Tabela 2 – Critérios utilizados na filtragem e quantidade total de trabalhos.

REVISTAS	Encontrados	Duplicados	Não relevantes	TOTAL
Design Studies	4	0	X	4
Aut. in Constr.	9	2	2	5
Scopus	26	4	1	21
Google Academic	24	1	8	15
Capes	8	1	X	7
Jstor	16	4	2	10
<b>TOTAL</b>	87	12	13	62

Fonte: O autor.

Depois da escolha dos trabalhos, na primeira etapa da revisão sistemática, as pesquisas selecionadas foram sintetizadas e avaliadas, a fim de identificar se o tema da pesquisa possuía propostas e resultados que auxiliassem na construção do processo paramétrico. Estas pesquisas foram a base para as buscas bibliográficas manuais, e foram complementadas por trabalhos aprofundados em temáticas específicas.

### **2.1.2 Revisão Manual**

A segunda etapa da revisão bibliográfica ocorreu em duas fases distintas. Inicialmente, durante os meses de setembro e dezembro de 2016, foram pesquisados trabalhos focados nos seguintes temas: entendimento da geometria fractal; aplicação de suas características na arquitetura; softwares que permitem sua aplicação; métodos para o desenvolvimento de processos; métodos para avaliar o comportamento da luz natural; e indicadores referentes ao comportamento da luz natural. A segunda etapa da revisão manual aconteceu durante os meses de outubro e dezembro de 2017. O objetivo era complementar assuntos que ainda precisavam ser aprofundados como, por exemplo: a avaliação dos elementos de fachada com características fractais e o comportamento da luz natural.

As buscas aconteceram a partir dos referenciais teóricos dos trabalhos encontrados na revisão sistemática, procurando por novas palavras-chave em repositórios e revistas. Entre as pesquisas foram encontrados: livros, teses, dissertações, artigos, documentários e aulas, aglomerando um apanhado de 69 trabalhos. Nesta parte da revisão, o número de trabalhos aumentou consideravelmente, porque a investigação não se limitava a um tema específico, nem possuía filtros, como datas. E como na revisão sistemática, os trabalhos passaram por uma filtragem buscando por artigos duplicados e concordância com os temas. No total, as buscas manuais apresentaram um número de 53 trabalhos, que podem ser observados na tabela 3, na qual estão dispostos também, os critérios de filtragem.

Tabela 3 – Critérios utilizados na filtragem e quantidade total de trabalhos selecionados nas buscas manuais.

TRABALHOS	Encontrados	Duplicados	Não relevantes	TOTAL
Geometria fractal	12	1	2	9
Geo. fractal na Arq.	14	3	2	9
Métodos	9	X	1	8
Softwares generativos e paramétricos	13	1	X	12
Comportamento lumínico	12	X	5	7
Indicadores lumínicos	9	X	1	8
<b>TOTAL</b>	<b>69</b>	<b>9</b>	<b>13</b>	<b>53</b>

Fonte: O autor.

A partir da revisão sistemática e manual foi desenvolvido um corpo teórico descrito nos próximos subcapítulos. Os subcapítulos compreendem os seguintes conteúdos: um resumo sobre a geometria fractal; a utilização desta geometria na arquitetura; os processos e softwares que são utilizados para recriar as suas características; os métodos e modelos que auxiliam o desenvolvimento do processo; e as simulações e indicadores que demonstram o comportamento da luz.

## 2.2 GEOMETRIA FRACTAL

Nesta seção são descritas as principais características da geometria fractal: propriedades, modelos para análise, a consequência psicológica de utilização, os diferentes tipos de padrões existentes e uma amostra de alguns desses padrões conhecidos. Esta caracterização de contextos relacionados com a geometria fractal apresenta significativa importância na construção do processo paramétrico, pois por meio destes diferentes referenciais as regras de composição dos painéis serão definidas, assim como a maneira de avaliar a dimensão fractal.

### 2.2.1 Padrões geométricos

Diferentes padrões geométricos são aplicados e observados desde as primeiras construções humanas. Para Baier e Sedrez (2013), as principais geometrias conhecidas e disseminadas foram desenvolvidas e organizadas no livro “*Os elementos*”, escrito por Euclides, no século 300 a.C. Neste livro são apresentados elementos geométricos regulares obtidos por meio de operações básicas e ferramentas manuais (régua e

compassos) que originam as formas planas, as lisas e as espaciais. Waihrich et al. (2010) descreve que a utilização das proporções e geometrias euclidianas foram e vêm sendo utilizadas por intermédio de padrões matemáticos, como a proporção áurea (razão de ouro), em construções, ornamentos, artes, mosaicos, pinturas e esculturas, por exemplo.

Rumiez (2013) comenta que projetos, componentes e ornamentos, referenciados em elementos da natureza, são nítidos durante a história da humanidade. A reprodução de formas naturais pode ser observada em diferentes locais e períodos históricos, como: em ornamentos das colunas egípcias; nas ordens gregas; detalhes estruturais e decorativos nas catedrais; entre outros. A apropriação de elementos naturais em elementos arquitetônicos é constatada pelo interesse humano em seguir determinados padrões dentro do campo da arquitetura e urbanismo, como o “*Homem Vitruviano*” de Leonardo da Vinci, *Le Modulor* de Le Corbusier, e proporções matemáticas como a áurea.

Esses diferentes padrões possibilitam o desenvolvimento de desenhos e ornamentos nas construções, permitindo sua identificação, interpretação histórica e a reprodução de suas sensações. Rumiez (2013) também descreve que a utilização de ornamentos foi interrompida ou posta em desuso pelos padrões estéticos regidos pelo modernismo, por motivos políticos, sociais e econômicos, durante o século XX. O pensamento moderno sobre a ornamentação neste período é descrito por Adolf Loos no manifesto “*Ornament and Crime*”, em 1908, publicado por Conrads (1971). Loos afirma que a evolução cultural é proporcional ao afastamento da ornamentação, atribuindo ao ornamento um atraso à evolução da moradia e dos modos do século XX e uma forma de arte cara que ocupa o lugar de outras.

Contudo, estudos sobre a ciência do caos e da complexidade se mostraram contrários aos pensamentos de arquitetos modernos, tendo influenciado diversas áreas, entre elas a arquitetura e o urbanismo. Para Venturi (1966), estas ciências complexas permitiram definir regras para desenvolver desordens complexas, discordando de princípios modernos que estavam coordenando os rumos da arquitetura em seu tempo. O autor retrata de forma negativa algumas características do modernismo, como a utilização de linhas retas, ambientes limpos, claros e sem ornamentação. Os estudos sobre os fractais ainda não estavam publicados quando Venturi escreveu o livro “*Complexity and Contradiction in Architecture*”, porém, o autor já descrevia a ideia de utilizar geometrias, desenhos ou padrões já conhecidos, mas de modo não convencional, criando novos e complexos significados para a arquitetura.

Para Complex Systems (2004), a procura por interpretar e descobrir padrões das caóticas forças da natureza resulta nas ciências complexas e do caos, denominadas de Limite do Caos (*edge of chaos*). Situadas entre os campos da estatística e o comportamento caótico, estas ciências descrevem a noção de auto-organização e padrões não lineares e buscam descobrir como a desordem pode ter ordem por meio da relação entre as partes de um sistema, sua adaptação e como interagem dentro de seus subsistemas.

Dentro destes padrões caóticos, o pensamento de que uma parte pode influenciar o comportamento de toda uma estrutura, e de sua organização, é uma ideologia aplicada à arquitetura desde as primeiras construções. Essa conexão que associa padrões, formas naturais e geometria, é utilizada por artistas, arquitetos e designers no desenvolvimento de conceitos e fundamentos de obra, podendo ser identificado em projetos e pensamentos de Frank Lloyd Wright e Piet Mondrian, por exemplo, que acreditavam que por meio da redução das formas naturais se conseguiria chegar em uma verdade formal. Wright acreditava na importância do estudo das formas básicas da natureza para estabelecer uma arquitetura emergente americana. E Mondrian utilizava do comportamento, ritmo e dinâmica da natureza em artes. (HARRIS, 2007).

A aplicação de padrões da natureza na arquitetura, busca o aprimoramento da capacidade humana de compreender o equilíbrio formal de diferentes composições e a diversidade como um todo. Os padrões geométricos euclidianos quando tendem a reproduzir as formas da natureza, podem se mostrar inadequados ou incompletos. Porque diversas formas encontradas na natureza não pertencem ao grupo de geometrias euclidianas como: curvas, superfícies sólidas e outras que apresentam determinados teoremas matemáticos. Em diversas situações, arquitetos se inspiram em elementos naturais para desenvolver partidos, formas e estruturas. A geometria fractal pode ser um padrão que potencializa o desenvolvimento destes diferentes fenômenos. (LANGHEIN, 2005; HARRIS, 2007; ASSIS et al., 2008; RIAM E ASAYAMA, 2016).

Esta geometria permite assimilar a padrões naturais e reproduzi-los empregando o termo fractal. Harris (2007) descreve que os primeiros estudos formalizados de Benoit Mandelbrot, sobre estes padrões matemáticos, iniciaram na década de 1950. Tendo esse termo citado pela primeira vez por Mandelbrot em 1977, com a publicação de seu livro “*The Fractal Geometry of Nature*”. Para descrever este padrão, Mandelbrot (1977) utilizou uma palavra que representasse as formas da natureza,

assim, empregou o adjetivo do latim “*fractus*” e o verbo “*frangere*” que possuem o significado de quebra. Barbosa (2007), afirma que os estudos de Mandelbrot sobre a geometria fractal surgiram a partir da investigação de pesquisas de Georg Cantor<sup>1</sup>. A descoberta dos fractais, além de contribuir para o campo das formas e padrões geométricos, potencializou as pesquisas sobre produção e transmissão de imagem.

Carpenter (1980) define os fractais como uma classe de estruturas compostas por padrões matemáticos que apresentam formas com grande irregularidade e que estão presentes em diversas figuras naturais. O autor ainda descreve que antes de serem publicados os estudos de Mandelbrot (1977), esta classe de formas e padrões era interpretada como um conjunto isolado da matemática e contemplando por poucos casos. Barnsley, Hutchinson e Stenflo (2005) descrevem que existe uma expressiva quantidade de modelos, em diversas áreas da ciência e tecnologia, que se identificam com as características dos fractais.

Os modelos descritos por Mandelbrot (1977) conseguem representar aspectos e formas naturais de maneira coerente, como desenhos de formatos de montanhas, de nuvens, de árvores, de linhas geográficas, de movimentação de ondas, de raios, entre outros, pois estes desenhos e formas apresentam padrões de progressão sem linearidade em sua composição. E aparentam interrupções, rugosidade e porosidade.

Os padrões fractais, além de serem utilizados no campo da geometria, podem ser identificados em outras áreas da ciência, como: na medicina, na análise da formação de patologias, e na transmissão neural; na eletrônica, se considerarmos comportamento físico em pequenas escalas; e na química, obtendo diferentes propriedades das matérias. (SAMPER E HERRERA, 2015).

### **2.2.2 Características Fractais**

Mandelbrot (1977) afirma que um fractal é uma estrutura que apresenta invariância independente da escala em que é observado e está sempre atrelado a um mesmo padrão ou forma, mantendo a sua estrutura original idêntica. O desenvolvimento de um fractal e seus padrões matemáticos são derivados de quatro principais características: auto-similaridade; complexidade infinita; irregularidade ou rugosidade; e uma dimensão não inteira. Esses atributos foram aprimorados por Falconer

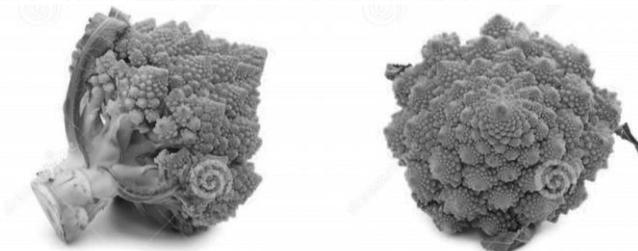
---

<sup>1</sup> Georg Ferdinand Ludwig Phillipp Cantor (1845-1918), matemático pela universidade de Berlim, estudou a teoria dos números gaussianos, além de noções do infinito real, e a não infinidade potencial de limites. (ALVEZ, 2008).

(2014) às características fractais são definidas como: estruturas finas; irregularidade; auto-similaridade; dimensão fractal; e recursividade. Estas características podem ser descritas minuciosamente como: o fractal possui uma fina estrutura detalhada em escalas arbitrariamente pequenas; fractais são irregulares para serem descritos na linguagem geométrica tradicional; os desenhos fractais são formados a partir da auto-similaridade; usualmente a dimensão fractal pode ser definida como uma dimensão topológica; a forma fractal é definida pela recursividade. Falconer (2014) define também que os fractais deveriam ser considerados de um ponto de vista biológico, sem um significado próprio, atribuindo à geometria uma lista de propriedades e características presentes nas definições de componentes vivos. Assim, quanto mais objetos descritos e interpretados com propriedades fractais, maior a possibilidade de compreensão de novas características.

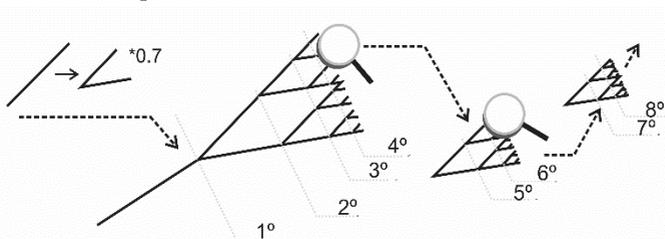
A auto-similaridade, também nomeada como auto semelhança, é identificada quando parte da figura ou contorno é replicada em escalas menores ou maiores. Esta característica pode ser observada em diferentes proporções, em formas naturais como em brócolis (figura 1), couve flor, folhas da samambaia, bacias hidrográficas, tempestade de raios, sistemas circulatórios, entre outros. A figura 2 demonstra um exemplo de uma forma fractal construída interativamente por meio da auto-similaridade. Neste exemplo, a primeira linha é dividida nas duas seguintes, seguindo um determinado padrão e escala, este mesmo padrão é repetido em cada linha formada, e o processo é replicado infinitas vezes. Com a exibição da figura em uma escala ampliada, pode-se notar que o mesmo desenho que iniciou a figura das duas linhas está presente em uma escala reduzida por toda a figura. (MANDELBROT, 1977. ASSIS et al., 2008. WAIHRICH, 2010).

Figura 1 – Auto-similaridade na estrutura de um brócolis.



Fonte: <https://pt.dreamstime.com/fotos-de-stock-couve-flor-e-br%C3%B3colis-image36087233>. Acesso: 12/03/2018.

Figura 2 – Exemplo de auto-similaridade.



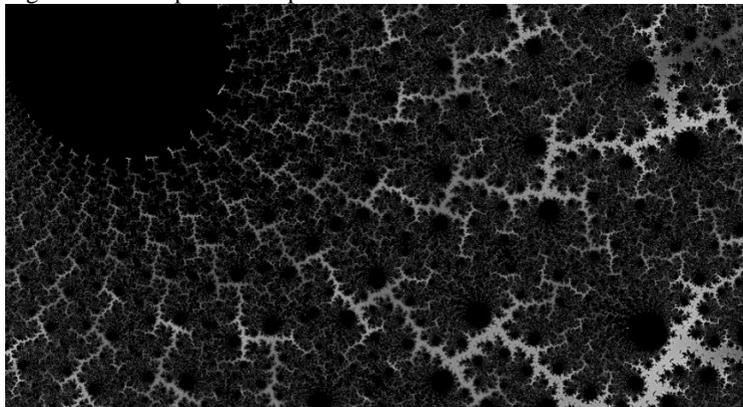
Fonte: O autor.

Mandelbrot apresentou uma série de publicações, entre o período de 1951 e 1975, com diversos campos de atuação e estudos envolvendo a característica da auto-similaridade. Estudos que reconheciam essa característica em diferentes campos da ciência e tecnologia, como: linguística; interferências em linhas telefônicas; cosmologia; economia; teoria de jogos; turbulência. (SALA, 2006).

A auto-similaridade é descrita por Sala (2006) como uma característica fractal comumente presente na composição das construções, podendo ser utilizada não intencionalmente e intencionalmente. Quando não intencional, a auto-similaridade aparece principalmente na relevância estética da construção, nos detalhes e nos ornamentos. Em composições intencionais, a característica da repetição é feita de maneira racional, distribuindo um caráter semelhante ou igual de um elemento iniciador em um determinado espaço. A autora também descreve que para a auto similaridade ser uma característica, ela deve estar integrada ao menos cinco vezes em um elemento ou composição.

A complexidade infinita refere-se ao processo recursivo para a criação de um elemento, como demonstrado na figura 3. Ou seja, as interações para criar um determinado elemento podem ser ilimitadas, podendo gerar, assim, figuras em escalas ínfimas. O terceiro atributo, a irregularidade, tem o sentido de rugosidade ou de não suavização, e se refere as partes que possuem extremidades irregulares, interrompidas ou fragmentadas, em qualquer escala observada. (ASSIS et al. 2008, MANDELBROT 1977).

Figura 3 – Exemplo de complexidade infinita.



Fonte: <http://www.rgbstock.com/photo/nzephyE/Fractal+Black+Hole>. Acesso: 12/03/2018.

A última propriedade dos fractais, descrita por Mandelbrot (1977), é a dimensão que o fractal possui, identificada pela dimensão  $D$ . Mandelbrot (1982) afirma que os padrões fractais existentes podem ser analisados e descritos por esta dimensão, como árvores e galáxias. Diferentes trabalhos pesquisaram a contagem da dimensão fractal, como Hargerhall, Purcell e Taylor (2004) que usam esta característica para descrever as silhuetas de paisagens. Lovejoy (1982) a utiliza na comparação da formação de diferentes nuvens. Morse et al. (1985) descrevem os padrões fractais em diferentes escalas no desenvolvimento de árvores e na relação da quantidade de insetos que utilizam este ambiente. Ribeiro e Miguelote (1998) e Peebles (1989) avaliam a dimensão  $D$  na distribuição das galáxias conhecidas e de seus aglomerados mapeados.

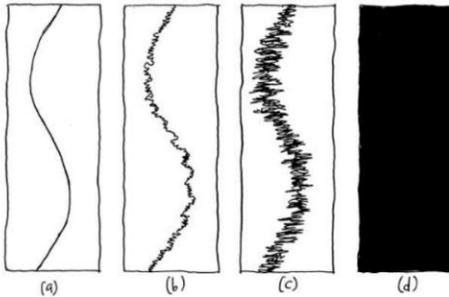
### 2.2.3 Dimensão Fractal

Mandelbrot (1977) afirma que a característica da dimensão fractal, ou dimensão  $D$ , pode identificar e medir diversos fractais por meio do “*box-counting*”. Spehar et al., (2003) comenta que a dimensão  $D$  pode ser utilizada para identificar fractais em diferentes abordagens, como: na natureza (árvores, montanhas, ondas); matemática (simulações computacionais); obras de arte (pintura, escultura); identificação de formas vivas (a partir do seu padrão de crescimento). ASSIS et al. (2008) descreve que esta característica fractal também é aplicada nas mais

diversas pesquisas e disciplinas, como: na medicina, em diagnósticos de câncer; nas telecomunicações, com o desenvolvimento de antenas; em estudos de mineralogia, aplicado a verificação da densidade e evolução de rochas e terrenos; no campo da biologia, na análise do crescimento de fungos e corais; na geografia, com a análise da formação de bacias hidrográficas e linhas de fronteira.

Lorenz (2009) explica que diversos objetos fractais não contém determinados padrões e interações fáceis de identificar, para estes objetos, a utilização do método de Mandelbrot, o “*box-counting*”, é um procedimento viável. Spehar et al. (2003) descreve que a dimensão fractal ou  $D$  pode ser determinada ao comparar o número de quadrados ocupados em uma malha em diferentes escalas, em que o “ $D$ ” é um valor entre 1,0 e 2,0. Estes valores são referentes à proporção que o contorno de uma determinada figura preenche no espaço. Para exemplificar as dimensões  $D$ , pode-se observar a figura 4, em que a primeira imagem demonstra um contorno (a) com  $D = 1,0$ , na sequência (b)  $D = 1,2$ , (c)  $D = 1,7$  e (d)  $D = 2,0$ .

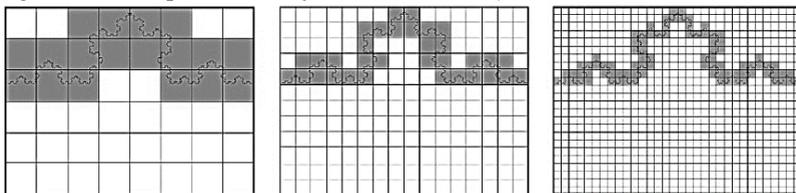
Figura 4 – Exemplo da dimensão fractal.



Fonte: Salingeros, (2012).

Spehar et al., (2003), Rabay, (2013) e Ostwald, Vaughan e Tucker (2014) comentam que o método funciona a partir da contagem de caixas, de uma malha, preenchidas pelo contorno de certa figura, é a contagem do número de espaços preenchidos que cobre esta malha. Em seguida, a dimensão dessa malha é reduzida em uma determinada escala, e o número de caixas preenchidas é contado novamente, conforme a figura 5. A média entre a diferença logarítmica e o número de caixas existentes para cobrir a figura ( $n$ ), pelo número de caixas preenchidas que compõem o contorno da figura ( $r$ ), correspondem a dimensão  $D$ , resultante do *box-counting*. Como demonstrado pela equação:  $d_r = \log n / \log r$ .

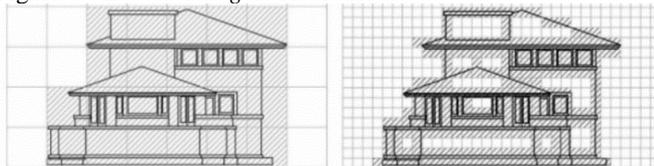
Figura 5 – Exemplo da utilização do *box-counting* na curva de Koch.



Fonte: Rabay, (2013).

As análises feitas pelo método do “*box-counting*” são empregadas por Bovil (1996), que as utilizou para avaliar construções como a Robie House de Frank Lloyd Wright, (demonstrada pela figura 6), e Villa Savoye de Le Corbusier. Para Lorenz (2009) a aplicação deste método aliado a programas computacionais, permite a leitura da utilização da auto-similaridade em projetos.

Figura 6 – *Box-counting* da Robie House.



Fonte: Ostwald, Vaughan e Tucker, (2014).

Vaughan e Ostwald (2010) descrevem que a contagem dos espaços preenchidos em relação aos espaços vazios ocorre em diferentes níveis e camadas. Um exemplo deste processo, demonstrado pelos autores, está na contagem da dimensão fractal dos quadros do pintor polonês Pollock’s. Suas obras foram analisadas por meio do *box-counting* em uma malha de 1m por 1m, até pedaços menores com 0.8mm por 0.8mm. Para os autores, esta técnica foi aprimorada por recursos atuais como ferramentas computacionais, que oferecem resultados mais seguros. Vaughan e Ostwald (2010) contestam alguns resultados da dimensão D de trabalhos antigos, afirmando que o número de caixas para a contagem e a escala utilizada, podem estar comprometidos por métodos manuais.

Outro modo de interpretar a dimensão fractal é descrito por Riam e Asayama (2016), pela dimensão Hausdorff (*Hausdorff dimension*), como uma medida matemática para validar fractais com auto-similaridade, baseada na teoria de mapeamento de contração (*contraction Mapping theory*). Ribeiro e Miguelote (1998) também descrevem a dimensão Hausdorff por meio de uma divisão da estrutura que deseja ser

medida. A geometria é dividida em segmentos que são incorporados por cubos tridimensionais em um determinado espaço com determinada dimensão (diferentemente da malha bidimensional do *box-counting*).

A contagem e interpretação da dimensão  $D$  também pode contribuir para o entendimento da preferência humana por diferentes paisagens e formas. Estudos de Pentland (1984) e Cutting e Garvin (1987) demonstraram que existe uma correlação positiva na interpretação visual de formas modeladas utilizando características fractais. E, para Spehar et al. (2003), estas diferentes dimensões fractais são perceptíveis ao olhar, existindo uma preferência humana por figuras que apresentam a dimensão fractal entre  $1.3D$  até  $1.5D$ . Em sequência, a tabela 4 mostra as diferentes dimensões fractais de alguns elementos naturais.

Tabela 4 – Exemplos de elementos naturais e suas dimensões  $D$ .

<b>FORMAS NATURAIS</b>	<b>DIMENSÃO <math>D</math></b>
Modelo de Galáxias	1.52
Padrões de rochas geotermiais	1.25 – 1.55
Árvores	1.28 – 1.90
Ondas	1.3
Nuvens	1.3 – 1.33
Anêmona do mar	1.6
Flocos de neve	1.7
Padrões minerais	1.78

Fonte: Salinas, (2012), adaptada pelo autor.

## 2.2.4 A geometria fractal e a redução do stress

Dentre os aspectos que impulsionaram o uso da geometria fractal na composição dos elementos de fachada, encontram-se a vantagem de ser uma geometria com padrões desenvolvidos por regras que possibilitam criar painéis complexos, e a característica dos fractais de trazerem uma leitura psicológica positiva do espaço que nos cerca. Esta percepção dos fractais acontece a partir de uma interpretação que o cérebro humano gera por meio da observação de objetos com características fractais. Essa interpretação ocorre e varia mediante uma característica fractal descrita por Mandelbrot (1977), a dimensão “ $D$ ”.

Salinas (2012) descreve que a ação das escolas modernistas de desassociar os elementos de ornamentação da estética dos edifícios, não obteve sucesso em relação a ideia de conforto nos usuários. O autor descreve que é natural que os ocupantes se sintam confortáveis em locais

que transmitem sensações por meio de ornamentações e detalhes (objetos, plantas, brinquedos, obras de arte, etc), diferentemente de espaços minimalistas, planos e vazios. Salingaros (2003) descreve que as características fractais desenvolvidas por ações naturais ou humanas são superiores a outros padrões geométricos quando se trata de transmitir uma sensação de excitação, ocasionando assim, uma redução no stress e um balanceamento entre as percepções negativas e positivas, nutrindo a mente com boas impressões e permitindo diminuir o comportamento depressivo.

A mente humana está pronta para associar e se adaptar a diversas linguagens e estruturas, possuindo uma resposta natural às propriedades fractais, identificando-as em diferentes cenários naturais e artificiais. Tracada (2016) afirma que o ser humano precisa do contato direto com as formas naturais e estruturas geométricas biológicas, pois este contato auxilia na saúde mental e social. Joye (2006) afirma que o interesse pelas composições geométricas orgânicas e pelas formas naturais é motivado por respostas positivas do cérebro, que assimilam ambientes naturais a maiores chances de sobrevivência. Parsons (1991), Spehar et al. (2003) e Joye (2007) demonstram que há uma resposta positiva, estimulada pelo padrão das formações fractais, devido a rápida interpretação e compreensão do cérebro em associar uma forma com características fractais a um local para se abrigar, alimentar, etc.

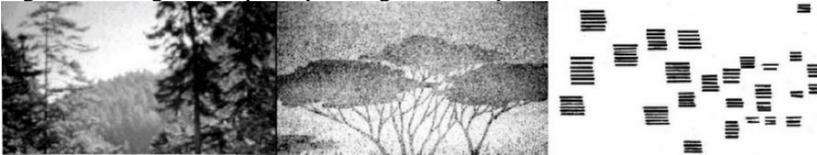
Spehar et al (2003) afirma que a visão humana apresenta diferentes respostas positivas ao observar figuras com composições fractais em organizações naturais, processos matemáticos e objetos artificiais. Os autores comentam que estas diferentes respostas são influenciadas pela dimensão fractal 'D' e estão presentes em todos os elementos da geometria fractal, variando entre 1.0D e 2.0D.

A redução do stress em ambientes com características fractais é descrita no trabalho de Wise e Rosenberg (1986), nele foram analisadas as reações de voluntários divididos em três grupos e submetidos individualmente a tarefas mentais, como contas aritméticas, problemas de lógica e pensamento criativo. Dependendo do grupo, eram submetidos a uma imagem de 1m de altura por 2m de largura durante a realização das atividades, esta imagem poderia ser uma figura pura de cor branca, um aglomerado de árvores ou uma árvore isolada em meio a uma savana. Os resultados a respeito do stress dos participantes foram mensurados a partir de eletrodos que medem a condução elétrica pela pele, demonstrando que os participantes expostos ao fundo de cor branca tiveram um aumento de stress em uma média de 15% superior; já os participantes submetidos a realização de tarefas com o painel das florestas tiveram uma redução no

stress de 3%, e os que executaram as atividades com a imagem da savana tiveram seu stress reduzido em média 44%.

Contudo, no experimento a imagem da savana não era uma fotografia, mas sim uma figura composta por inúmeros fractais. Na figura 7 é possível observar duas das imagens utilizadas no experimento (a floresta e a savana), além da composição fractal da figura da savana, com maior precisão. (WISE e ROSENBERG, 1986).

Figura 7 – Imagem composta pelas figuras do experimento.



Fonte: Wise, J. e Rosenberg, (1986), adaptado pelo autor.

Outros estudos que interpretaram a relação da preferência humana com as formas fractais são descritos por Hargerhall, Purcell e Taylor (2004). O primeiro, demonstra a relação da preferência visual humana por linhas de contorno fractais. Esse estudo fez com que 119 participantes observassem paisagens com diferentes silhuetas fractais e demonstrassem suas preferências. Os contornos foram utilizados para identificar se existia a preferência por diferentes dimensões  $D$ , desenvolvendo, assim, a hipótese de que a dimensão fractal poderia fornecer uma explicação para a preferência humana à naturalidade de alguns cenários que apresentam características fractais. Em outro estudo descrito por Taylor (2006), 120 pessoas foram questionadas sobre sua preferência visual em relação a diferentes figuras. E a maioria dos participantes, (90%), preferiu as imagens que apresentavam algum padrão fractal as que não possuíam.

Com base em estudos como os de Wise e Rosenberg (1986) e Hargerhall, Purcell e Taylor (2004), autores como Salingaros (2003), Taylor (2006) e Joye (2007) comentam um conjunto de sete possíveis razões que associam os fractais com as positivas interpretações humanas. Essas razões compreendem processos biológicos, como organização cerebral, batimentos cardíacos, movimentação dos olhos, e extinto, a padrões evolutivos como, captação de informação, instinto de sobrevivência e expressões artísticas.

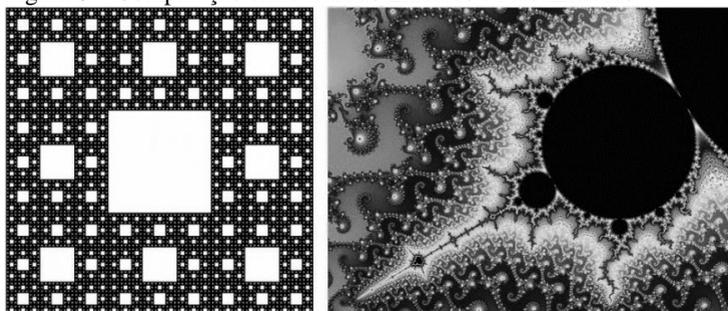
Anderson e Mandell (1996) complementam que a percepção humana é transmitida por meio de funções cerebrais em padrões fractais de proporção. Assim, ao observar composições com auto-similaridade ou

formas naturais, a leitura e compreensão da nossa consciência é otimizada.

### 2.2.5 Fractais Lineares e Não Lineares

Os fractais podem ser divididos em dois diferentes grupos principais, variando de acordo como são gerados e pela complexidade de seus resultados formais, sendo identificados como fractais Lineares e Não Lineares. Os fractais descritos como lineares são figuras clássicas e menos complexas, podem ser identificados por meio de sua dimensão fractal e modo como são iterados (I.F.S e L-Systems), como exemplos destes fractais podemos citar o Triângulo de Sierpinski, Ilha de Kock, Curva de Peano, entre outros. Os fractais pertencentes ao grupo dos Não Lineares estão conectados diretamente com a Teoria do Caos, possuem sua forma com resultados complexos e são obtidos por meio de números complexos. Esta categoria de fractais relaciona o número resultante de sua iteração com uma série de outros números que divergem em diferentes iterações, e dependendo desta sequência, podem ser colorizados. Como principais objetos fractais pertencentes a este grupo temos o Conjunto de Mandelbrot e o Conjunto de Julia. A figura 8 demonstra um comparativo entre a complexidade de dois padrões fractais, um linear e outro não linear. (SEDREZ, 2009; SEDREZ, 2016).

Figura 8 – Comparação entre fractais Lineares e Não Lineares.



Fonte: <https://uncloaked.wordpress.com/2014/01/24/fabulous-fractals/> acesso: 12/03/2018, adaptado pelo autor

### 2.2.6 Padrões Fractais Iterados

Para Barbosa (2007) os padrões fractais que apresentam uma regra fixa em seu processo de iteração substituídos por uma mesma geometria

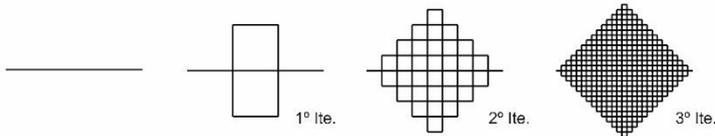
definida, podem ser denominados fractais determinísticos ou geométricos, e comumente esses padrões fractais apresentam a regra da auto-similaridade. Rabay (2013) descreve que estes fractais podem ser divididos em quatro diferentes grupos de acordo com a sua forma de geração; os fractais de fronteira; gerados por remoção; Dürer; e tipo árvore. Na sequência serão apresentados alguns destes fractais divididos nestes quatro grupos diferentes.

### 2.2.6.1 Fractais de Fronteira

Os fractais com padrão de fronteira são os que apresentam suas iterações por meio da substituição de uma determinada parte de sua forma geradora, repetindo esta substituição nas suas diferentes iterações, tendo sua área variante conforme a dimensão da estrutura que a regra irá substituir. Como exemplos deste tipo de padrão fractal temos: a Curva de Peano; Ilha de Koch; Curva de Dragão; Curva de Minkowski; entre outros. (BARBOSA, 2007; RABAY, 2013).

A Curva de Peano, tem como sua forma inicial (geradora) uma reta, sua primeira iteração divide esta reta em três partes iguais, e substitui a parte central desses segmentos por um quadrado na parte superior e inferior. Com o decorrer das iterações os quadrados adicionados aos segmentos vão diminuindo, preenchendo os espaços vazios da forma. A figura 9 demonstra a construção deste fractal em diferentes iterações. (RABAY, 2013).

Figura 9 – Fractal linear Curva de Peano.

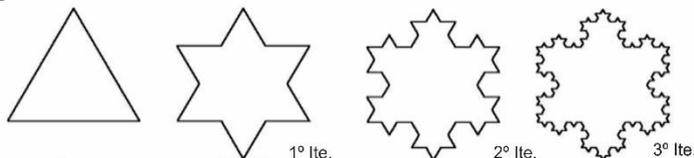


Fonte: Sedrez, (2009), adaptado pelo autor

A ilha de Koch tem na sua forma inicial o desenho de um triângulo equilátero. O processo se inicia dividindo-se cada um dos lados do triângulo em três partes, em que a parte central de cada segmento de reta é substituída por um triângulo semelhante ao inicial. A parte central preenchida com a linha do outro triângulo é excluída do conjunto, o processo é repetido nos três lados, formando 12 segmentos de reta. Em uma próxima iteração todos estes doze segmentos de reta serão divididos

em três partes, repetindo o processo anterior, conforme a figura 10. (ASSIS et al., 2008).

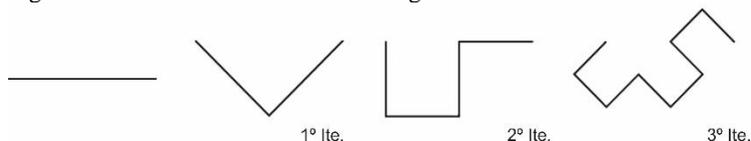
Figura 10 – Fractal linear Ilha de Koch.



Fonte: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172008000200005](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172008000200005), acesso: 12/03/2018, adaptado pelo autor.

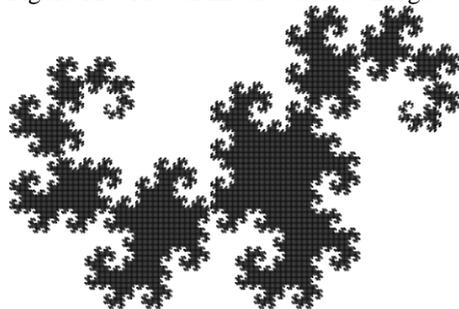
A Curva de Dragão tem sua primeira iteração desenvolvida por meio de uma reta, a regra que guia este padrão substituí esta reta por duas linhas conectadas. Esta iteração pode confrontar ou não com as linhas já existentes, sendo que um padrão conhecido deste fractal é o Harter-Heighway, no qual as duas linhas que substituem a reta inicial nunca chegam a se cruzar. A figura 11 demonstra um exemplo da aplicação da Curva de Dragão, e na sequência, a figura 12 demonstra o padrão geométrico formado pela Curva de Dragão de Hater-Heighway. (RABAY, 2013).

Figura 11 – Fractal linear Curva de Dragão.



Fonte: O autor.

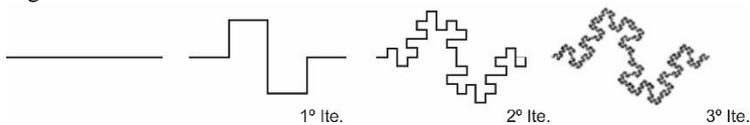
Figura 12 – Fractal linear Curva de Dragão de Hater-Heighway, na 16 iteração.



Fonte: <https://bentrubewriter.com/2012/04/25/fractals-you-can-draw-the-dragon-curve-or-the-jurassic-fractal/>, acesso: 12/03/2018.

A Curva de Minkowski tem como elemento iniciador uma reta. A regra que desenvolve esse padrão fractal é formada por meio da divisão desta linha em quatro partes iguais, os dois elementos centrais desta divisão são substituídos individualmente por um quadrado e orientados em sentidos opostos. Contudo, diferentemente da Curva de Peano os quadrados adicionados não possuem como base a linha que está conectada, criando assim uma nova linha com diversos segmentos de reta. A figura 13 ilustra o padrão fractal e suas diferentes iterações. (SEDREZ, 2009).

Figura 13 – Fractal linear Curva de Minkowski.



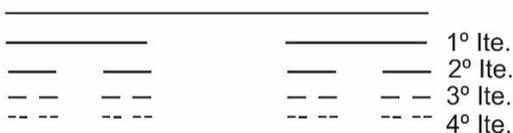
Fonte: O autor.

#### 1.1.1.1 Fractais por Remoção

Os fractais deformados por remoção são aqueles gerados a partir da subtração de uma ou mais partes de sua forma inicial. Como exemplo destes fractais podemos citar: o Conjunto de Cantor; Triângulo de Sierpinski; Tapete de Sierpinski; Quadrado de Gasket; entre outros.

O Conjunto de Cantor ou Poeira de Cantor, segundo Assis et al. (2008), foi criado por Cantor (1845–1918) que propôs o conceito de uma forma infinita. A forma inicial parte de um segmento de reta, este segmento é dividido em três partes iguais que são movimentadas, a parte central delas é descartada, sobrando somente dois segmentos de reta que são separados pela distância do segmento excluído, conforme demonstrado pela figura 14.

Figura 14 – Fractal linear Conjunto de Cantor.

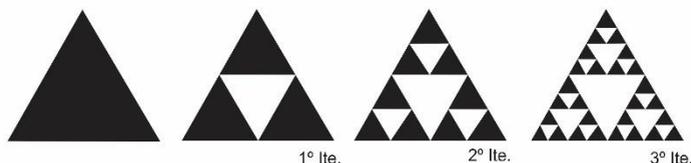


Fonte: O autor.

O Triângulo de Sierpinski tem como forma inicial um triângulo, a iteração inicia pela divisão deste triângulo em outros quatro triângulos, um para cada extremidade da forma e outro para o centro. O triângulo

central é subtraído da forma, permanecendo somente os outros três. As demais iterações irão ocorrer nos outros três triângulos restantes, subtraindo partes da forma inicial na sequência. A figura 15 ilustra a formação este fractal. (NUNES, 2006).

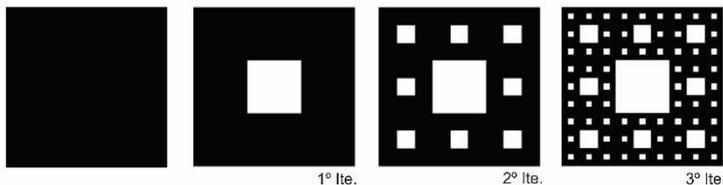
Figura 15 – Fractal linear Triângulo de Sierpinski.



Fonte: O autor.

Uma variação do Triângulo de Sierpinski é o Tapete de Sierpinski, neste padrão fractal ao invés da forma inicial ser um triângulo a geometria se constrói em um quadrado. A regra que compõe este fractal prevê a divisão da forma inicial da geometria em nove partes iguais (uma matriz de três por três), o quadrado central é removido, mantendo os outros oito que irão continuar as iterações. A figura 16 ilustra o padrão fractal. (RABAY, 2013).

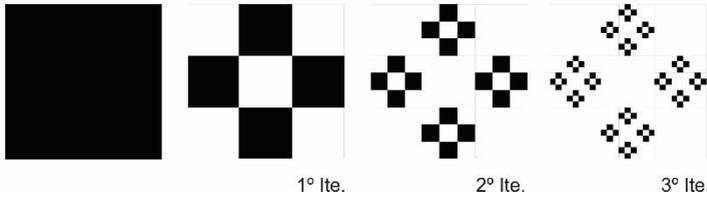
Figura 16 – Fractal linear Tapete de Sierpinski.



Fonte: <http://matematicadorenato.blogspot.com.br/2016/04/fractais-tapete-de-sierpinski.html>, acesso: 13/03/2018, adaptado pelo autor.

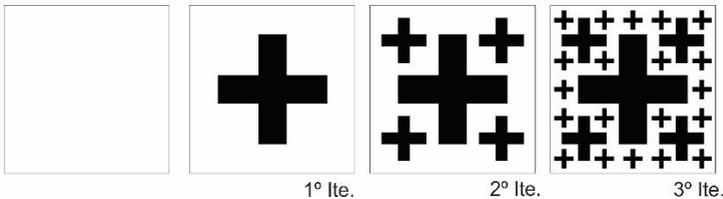
O quadrado de Gasket ou “*Square Gasket*” é uma variação do Triângulo de Sierpinski Gasket, sua estrutura consiste em dividir uma figura bidimensional quadrada em nove partes iguais em escala menor. Os lados das figuras menores representam o comprimento inicial dividido por três ( $L/3$ ), neste processo, os quadrados centrais serão subtraídos sobrando assim, cinco dos nove quadrados menores. O processo se repete inteirando esta regra em recursão infinita, a figura 17 representa o quadrado de Gasket. (SALINGROS, 2003).

Figura 17 – Fractal linear Quadrado de Gasket.



Fonte: O autor.

O padrão fractal que descreve a *Jerusalém Cross*, pode apresentar diferentes variações, contudo o resultado deste fractal é a composição de subtrações no formato de uma cruz em uma determinada forma. Para exemplificar temos a forma inicial de um quadrado, a regra que irá compor o fractal dividirá a geometria em treze quadrados, sendo os próximos aos cantos em escala maior. Os cinco quadrados centrais são removidos, criando assim a figura de uma cruz. Esta regra é iterada nos demais quadrados repetidas vezes, subtraindo cada vez mais a forma inicial, a figura 18 ilustra o padrão fractal. (RABAY, 2013).

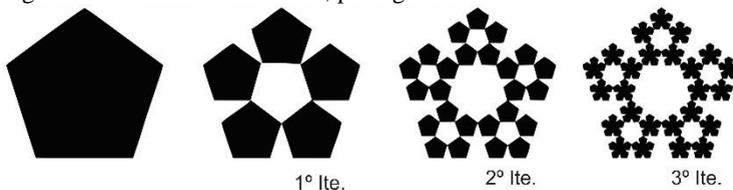
Figura 18 – Fractal linear *Jerusalem Cross*.

Fonte: O autor.

### 2.2.6.2 Fractais Dürer

Os fractais de tipo Dürer tem como princípio a substituição da forma principal pela mesma forma em uma escala diferenciada. Como exemplo temos o fractal de tipo Dürer pentagonal, quando aplicada a regra à geometria inicial, esta é substituída pela mesma forma uma quantidade de vezes igual ao número de lados do pentágono. As geometrias secundárias podem estar conectadas ou não, e o processo se repete para cada forma, infinitas vezes. A exemplo deste tipo de fractais estão a sequência de diferentes formas em um pentágono (figura 19) e em um hexágono (figura 20). (RABAY, 2013).

Figura 19 – Fractal linear Dürer, pentagonal.



Fonte: O autor.

Figura 20 – Fractal linear Dürer, hexagonal.



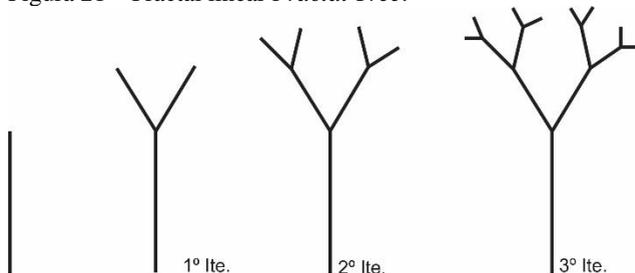
Fonte: O autor.

### 2.2.6.3 Fractais tipo árvore

O fractal do tipo árvore tem seu processo iterativo por meio de ramificação, reproduzindo a sua forma inicial em diferentes direções, ângulos e quantidades. Este padrão de fractal apresenta diversas figuras semelhantes na natureza. E como exemplo deste tipo de fractal temos: árvore bifurcada (*Fractal Tree*); árvore de pitagórica; entre outras. (RABAY, 2013).

A árvore fractal (*fractal tree*) tem como forma inicial uma linha, e a regra que a constrói se inicia por meio da reprodução da reta inicial. Esta reta é repetida uma ou mais vezes em ângulos, sentidos e posições diferenciadas. A reprodução desta forma pode ter sua escala reduzida ou ampliada, como demonstra a figura 21.

Figura 21 – Fractal linear *Fractal Tree*.



Fonte: O autor.

Estes diferentes tipos de fractais lineares foram interpretados com o intuito de identificar suas regras, e então recriá-las no desenvolvimento dos elementos de fachada. Desses padrões apresentados apenas os fractais de tipo Dürer não foram utilizados na composição do processo. Ao total, dez padrões de fractais não lineares, com seus princípios e características, serão adaptados para uma sequência de regras que norteará o desenvolvimento dos elementos de fachada resultantes do processo paramétrico.

## 2.3 A GEOMETRIA FRACTAL NA ARQUITETURA

Após a demonstração das diferentes características e da exemplificação de alguns dos padrões da geometria fractal, buscou-se pela aplicação desta geometria dentro do campo da arquitetura e urbanismo. Identificando os elementos arquitetônicos formados por meio da aplicação de padrões da geometria fractal e localizando os diferentes períodos em que foram utilizados. A fim de analisar as possíveis aplicações da geometria, tornando possível a criação e a aplicação das regras dentro dos painéis através do processo paramétrico.

### 2.3.1 Modelos para aplicação dos fractais na arquitetura

A utilização de regras e parâmetros para a composição de uma forma é uma característica presente ao longo da história da arquitetura. No século XV, o arquiteto Paládio utilizou da lógica empregada na composição das colunas gregas e romanas para desenvolver o processo da concepção de suas próprias colunas. No século XVIII, o arquiteto francês Durand fornecia a seus alunos um conjunto de regras para que eles as interpretassem, a fim de compreender como se cria um projeto arquitetônico. No decorrer do século XX, Sullivan desenvolveu uma série de regras e instruções para a criação de ornamentos. Na década de 1960, Christopher Alexander, desenvolveu um conjunto de regras em um algoritmo que buscava solucionar alguns problemas urbanos, como esquinas de ruas, vistas de pedestres, acessos públicos, entre outros. (RASHAD e AFRAIS, 2010. DURAND, 2000. ALEXANDER, ISHIKAWA e SILVERSTEIN 1977).

A aplicação de padrões para nortear as composições humanas é uma instrumentação comum dentro da arquitetura, e ao tratar de regras que permitem composições naturais, o uso das características fractais é o mais adequado. A geometria fractal está presente nas composições humanas há séculos, no campo da arquitetura ela pode ser encontrada na

formação de plantas baixas, fachadas e ornamentos. A utilização das características da geometria fractal está presente em inúmeras construções e objetos concebidos pela mão de obra humana, demonstrando que a tecnologia não é uma barreira para sua aplicação. Atualmente, o uso de características fractais aparece em projetos arquitetônicos por meio da programação computacional e processos recursivos. (SALINGAROS 2012).

Diferentes autores relacionam inúmeras situações em que os fractais podem ser observados em partidos arquitetônicos ou construções. Dentre estas análises arquitetônicas pode-se citar Sedrez (2010) com os modelos conceituais, geométricos e lúdicos. Joye (2007) relata que as características fractais podem estar presentes nas construções em dois contextos, no partido geral ou no desenvolvimento de um volume específico, e são aplicadas por meio de ferramentas, técnicas, e em diferentes etapas do projeto arquitetônico. Para Sala (2003) o uso dos fractais está em aplicações consciente ou inconsciente.

Segundo Sedrez (2010) as características da geometria fractal aplicadas a arquitetura podem acontecer em modelos conceituais, geométricos e intuitivos. Os modelos conceituais utilizam as características e padrões fractais para nortear o partido e o projeto. Os modelos geométricos são aqueles que apresentam na forma da construção características fractais, tendo a possibilidade de análise por métodos como o *box-counting*. Já os modelos intuitivos utilizam os resultados geométricos dos fractais como inspiração. Segundo Sedrez e Pereira (2009), a geometria também pode ser aplicada nas escolas de arquitetura por meio de um modelo educacional, como um modo de incentivar a percepção criativa do aluno, aguçando o desenvolver de novas perspectivas formais, ampliando o seu vocabulário de formas e ensinando os princípios de conceitos morfológicos, sistemas generativos e formas aleatórias.

Para Joye (2007) o uso das características fractais está presente no campo da arquitetura em duas formas. A primeira, na contribuição desta geometria no desenvolvimento de ferramentas que estimulam a criatividade e a idealização de novas formas, composições, padrões de organização e elementos sólidos. A segunda forma compreende a utilização da geometria em técnicas de análise de estruturas.

Sala (2003) classifica que uma das características da geometria fractal, a auto-similaridade, é aplicada na arquitetura de modo inconsciente e consciente. A primeira designa as características fractais em uma construção de modo não intencional, sendo utilizada por diferentes razões e identificada após a execução. A outra forma é

empregada ao projeto conscientemente, de acordo com a decisão do projetista.

Sala (2006) comenta que as características fractais podem ser observadas em construções e organizações urbanas. Estas propriedades são perceptíveis na implementação de pequenas escalas do projeto (desfragmentadas), na escala macro e sua relação com as menores, no componente de auto semelhança entre as partes, e na utilização de iteração de componentes. Na escala urbana as características fractais aparecem na organização e auto semelhança de suas partes, e nos componentes do tecido urbano em suas escalas menores.

### **2.3.2 Utilização da geometria fractal na arquitetura**

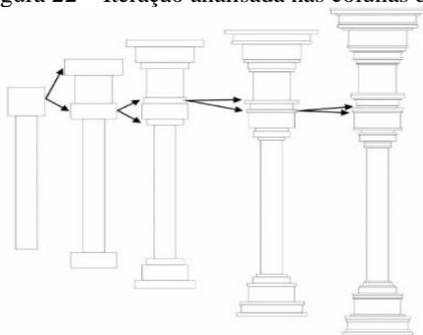
Os fractais estão presentes na arquitetura em seu contexto geral ou em diferentes detalhes e volumes singulares. Segundo Joye (2007), com relação à contextualização geral, pode-se analisar diferentes plantas baixas e identificar características fractais na sua formação. Como exemplo desta aplicação bidimensional temos as fortificações das vilas Ba-ili (Zâmbia), as modulações da Palmer House em Michigan (EUA), entre outros projetos. Em uma escala tridimensional a aplicação das características fractais aparece de modo mais perceptível, sendo identificada em detalhes ou elementos compositivos como nos templos Hindus, construções Góticas (catedral de Notre Dame), em obras Russas de Malevich (*Arkhitektoiniki*), no Storey Hall (Melbourne).

Dantas (2010) descreve que existe uma infinidade de construções, em diferentes períodos históricos e localizações geográficas, que podem caracterizar a utilização dessa geometria, como em construções mediáveis, barrocas, catedrais, hindus, projetos de Frank Lloyd Wright e Louis Sullivan. Joye (2007) comenta que o uso das composições fractais vai além do campo da arquitetura, podendo ser utilizada em diversas amostras gráficas e artísticas. Os fractais não aparecem em composições somente a partir da década de 1970, mas também em diversas obras artísticas e arquitetônicas anteriores a este período.

Capo (2004) analisou a composição e descreveu algumas características da geometria fractal que estão presentes em elementos comumente conhecidos da arquitetura, como nas colunas desenhados por Palládio por meio das ordens clássicas. Para o reconhecimento destes padrões, o autor utilizou de duas técnicas: o *box-counting* e a relação entre o número e a dimensão de intervalos entre pontos. Estas técnicas demonstraram que os fractais estão presentes nas colunas descritas pelo autor como “arquitetura com natureza fractal”. Os atributos observados

são a arbitrariedade em escalas menores, e a auto-similaridade em ações recursivas. Esta análise pode ser visualizada a partir da figura 22. O padrão identificado é semelhante as modificações encontradas na Conjunto de Cantor, em que um grande espaço ou preenchimento está cercado por outros em escala menor.

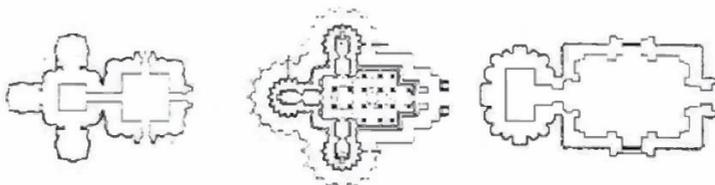
Figura 22 – Iteração analisada nas colunas de Palladio.



Fonte: Capó (2004).

Outra linguagem arquitetônica que utiliza dos princípios da geometria fractal são os templos Hindus. Trivedi (1989) e Rian et al. (2007) descrevem uma relação próxima entre o entendimento da cultura e ritos da religião Hindu com algumas das características desta geometria, como a auto-similaridade e a fragmentação. Esta relação é perceptível ao observar os quatro elementos que compõem os templos Hindus. O *Jaggedness*, o limite visual do templo, composto por subtrações, cortes e quebras na superfície. As ornamentações que revestem o templo com figuras de animais e seres humanos. A repetição em escala, em que os diferentes elementos e formas são escalonados em partes menores e recursivamente. E a forma da planta baixa, na qual os limites da composição são fragmentados por meio de um processo de auto-similaridade, iterados repetidas vezes como demonstrado pela figura 23.

Figura 23 – Plantas de templos Hindus.

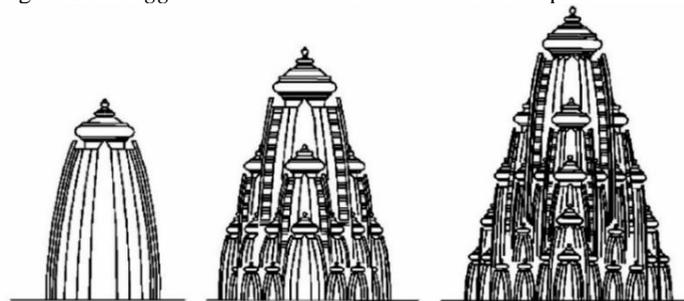


Fonte: Trivedi (1989).

Trivedi (1989) comenta que a relação entre as características fractais e a arquitetura Hindu está na espiritualidade, na filosofia e na cosmologia da religião. O autor descreve que para os hinduístas, a essência do cosmos é representada por um holograma, em que a mínima fração desta projeção faz parte do todo, e com a ausência desta fração a imagem não se completa, assim tudo que compõe o cosmo é o próprio cosmo. Esse princípio da filosofia hindu se denomina de *Holonomic*. Para manter a harmonia entre o pensamento e as construções religiosas, os princípios culturais da religião são transmitidos para a arquitetura, usando de propriedades como a homogeneidade, auto-similaridade e simetria.

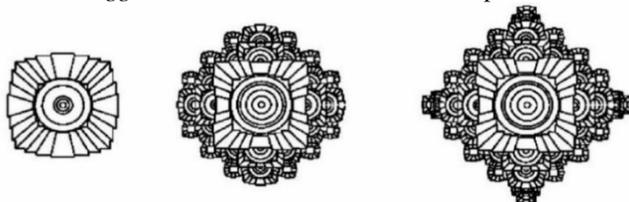
Para Trivedi (1989) a associação e a concepção da filosofia Hindu com seus templos são baseadas em três formas geométricas: o triângulo, o quadrado e o círculo. Estas geometrias são integradas em um único elemento por meio de regras e regidas por padrões fractais, transformando formas básicas em geometrias complexas. Os principais padrões utilizados são a fragmentação, auto-similaridade e a repetição de formas em superposição e justaposição. Estas características podem ser observadas pela figura 24 e 25, que apresentam padrões fractais na *jaggedness*, e a figura 26 que representa a característica da auto-similaridade na composição da forma dos templos.

Figura 24 – *Jaggedness* nos limites horizontais do templo.



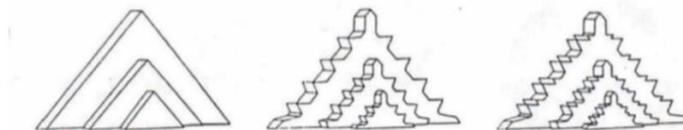
Fonte: Rian et al. (2007)

Figura 25 – *Jaggedness* nos limites verticais do templo.



Fonte: Rian et al. (2007)

Figura 26 – Auto-similaridade na ornamentação do templo Hindu.



Fonte: Trivedi (1989), adaptado pelo autor.

Características fractais como a auto-similaridade, também estão presente em obras da arquitetura oriental, para Sala (2003) este atributo pode ser identificado em duas situações, na composição das plantas e formas. Na primeira, este padrão fractal é observado na repetição de diferentes escalas de uma forma, como demonstrado no templo chinês de *Kaiyuan Si Pagoda's*, onde a forma octogonal é repetida em diferentes escalas, e na própria forma do edifício em que um mesmo volume é repetido em diferentes escalas.

A aplicação das características fractais é constatada na composição de formas e em configurações de cidades e vilas africanas antes da inserção e colonização dos padrões europeus. Um exemplar da aplicação da regra da auto-similaridade na organização destas antigas comunidades é o vilarejo de *Ba-ili*, localizado no sul do Zâmbia, (figura 27). Está vila apresenta a forma de meia lua, repetida em diversas escalas e padrões, reflexo das influências e características religiosas e sociais em sua estruturação. (EGLASH, 1999).

Figura 27 – Vilarejo de *Ba-ili*.



Fonte: <http://homepages.rpi.edu/~eglash/eglash.dir/afactal/>, acesso: 13/03/2018.

Ramzy (2015) comenta que o termo geometria sagrada é comumente usado para retratar crenças espirituais repassadas por diversas formas e padrões geométricos, esta expressão é utilizada por inúmeras

culturas e associada a formas derivadas da matemática e da natureza. Para a arquitetura gótica, essas formas eram representadas por composições inicialmente euclidianas, sendo Deus representado por um círculo e os seres humanos pelas formas do quadrado e retângulo. Assim, algumas das catedrais possuíam seus desenhos a partir de duas regras. A primeira, iniciando o desenho por um círculo, e tendo suas demais formas desenvolvidas com auxílio de regras como a proporção áurea<sup>2</sup>. E a segunda, focando na simetria da planta, tendo as demais composições baseadas em padrões da natureza, apropriação inconsciente da geometria fractal.

Ramzy (2015) relata o uso das características da geometria fractal na composição de diferentes estruturas durante o período gótico, por artistas e arquitetos, mesmo não tendo conhecimentos científicos sobre o assunto. O autor descreve que os padrões fractais não estão presentes somente na ornamentação das construções góticas, mas também nos desenhos de plantas, composições exteriores, interior e estruturais. Em planta, são perceptíveis detalhes que se assemelham a Curva e a Ilha de Koch, principalmente nos limites das paredes externas. Na composição exterior, vários ornamentos têm sua escala reduzida em diferentes iterações, como capelas, portas, coroamento de esquadrias e elementos estruturadores (pilares e arcos), conforme demonstrado pela figura 28. Samper e Herrera (2015) também comentam a respeito das rosáceas, em que muitas delas eram desenvolvidos por meio de padrões fractais inconscientes. Estas rosáceas, elementos translúcidos importantes neste período, foram denominadas como “*the Gods eyes*”.

Figura 28 – Detalhes catedral gótica.



Fonte: Ramzy (2015).

---

<sup>2</sup> A proporção áurea ou “*Golden Mean*“, é um padrão matemático comumente utilizado nas composições humanas, o sistema é constituído de dois elementos ou dois segmentos de linha que não são iguais, seguindo a proporção que  $a/b = (a+b) / a = 1.61803$ , o resultado numérico final também é conhecido como a sequência de Fibonacci. Essa proporção também é atribuída na composição do Homem Vitruviano. (RAMZY 2015).

A característica da auto-similaridade na composição de plantas e sólidos é perceptível também em diferentes construções europeias renascentistas, identificadas principalmente em ornamentos e decorações. Sala (2003) descreve que algumas dessas construções apresentam semelhanças evidentes a padrões fractais. Ramzy (2015) comenta que durante o renascimento a geometria utilizada para se desenvolver ornamentos e arquitetura era baseada na matemática que conduzia a natureza, pois estas proporções e regras estavam diretamente ligadas a uma linguagem divina. Como exemplo da utilização deste padrão em construções renascentistas, temos o *Castel del Monte*, no sul da Itália, que remete a um fractal do tipo Dürer, figura 29.

Figura 29 – *Castel del Monte*.

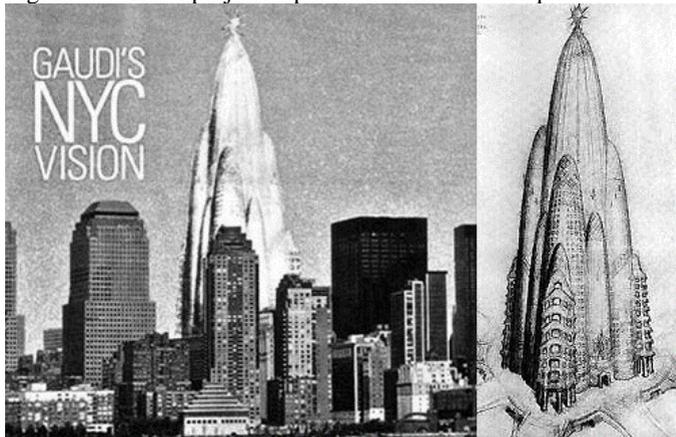


Fonte: <http://www.amusingplanet.com/2017/08/castel-del-monte-andria.html>, acesso: 13/03/2018.

Sala (2003) descreve diversos arquitetos e obras que utilizaram das características fractais já no século XX. Como Antônio Gaudí (1852-1926), que desenvolveu diversos projetos, formas e ornamentos com as características fractais, como por exemplo, seu projeto de um hotel para a Nova Iorque, (figura 30). Na arquitetura soviética, o arquiteto e artista Kazimir Malevich (1878- 1935) desenvolveu projetos e esculturas que utilizam da escala como partido, compostas por um mesmo volume alterado em diferentes escalas, remetendo a auto-similaridade, (figura 31). Pode-se identificar a utilização de características fractais, como a auto-similaridade, em plantas e volumes das obras do Frank Lloyd Wright (1867–1959), tendo como exemplo os projetos da Palmer House, Robie House, e o Marin County Civic Center. Em projetos do arquiteto Italiano, Paolo Portoghesi, pode-se observar a presença de características fractais para desenvolver as plantas de alguns trabalhos como Villa Papadancine (1966), e o Chamber of Deputies (1967). Nestas obras o arquiteto usou

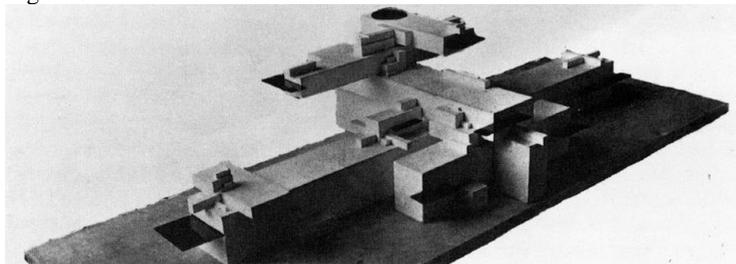
diferentes escalas de círculos para unificar as linhas que compõem suas plantas.

Figura 30 – Hotel projetado por Gaudi em Nova Iorque.



Fonte: <https://ny.curbed.com/2013/6/24/10229226/antoni-gaudis-fantastical-futuristic-1908-hotel-attraction>, acesso: 13/03/2018.

Figura 31 – *Arkhitektons* de Kazimir Malevich.

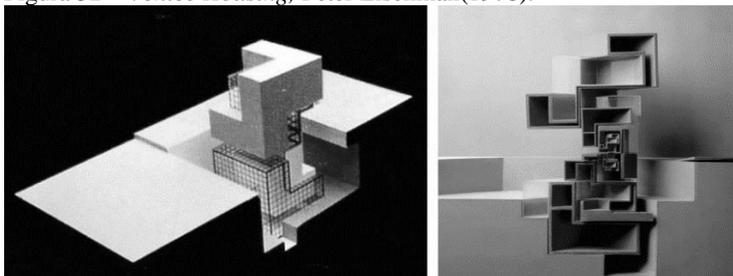


Fonte: <https://thechanelhouse.org/2014/03/12/suprematism-in-architecture-kazimir-malevich-and-the-arkhitektons>, acesso: 13/03/2018.

Contudo, conforme Ostwald (2001), as características fractais foram mencionadas e utilizadas de modo racional pela primeira vez pelo arquiteto Peter Eisenman em 1978, com a casa 11<sup>a</sup>, para a competição “*Venice Housing*”, (figura 32). Neste projeto, o arquiteto utilizou de três conceitos que podem ser associados aos fractais, a descontinuidade, recursividade e a auto-similaridade. A casa é composta de dois quadrados que tem suas partes subtraídas, dando o formato semelhante a letra “L”. Esta forma é escalonada em um processo recursivo, diminuindo o volume a cada iteração. Em outro projeto de Eisenman, o “*Moving Arrows, Eros*

*and other Eros*”, (1985) ” (figura 33), o arquiteto utilizou novamente de características como a descontinuidade, recursividade e a auto-similaridade, dialogando com aspectos fictícios. O autor ressalta que Peter Eisenman já empregava o conceito de escala em outros projetos, porém neste ele utilizou de formas desenvolvidas por Mandelbrot (1977), para criar suas proporções, recriando partes e formas em diferentes locais do projeto, com características autônomas.

Figura 32 – *Venice Housing*, Peter Eisenman(1978).



Fonte: <https://ny.curbed.com/2013/6/24/10229226/antoni-gaudis-fantastical-futuristic-1908-hotel-attraction>, acesso: 13/03/2018, adaptado pelo autor.

Figura 33 – *Moving Arrows, Eros and other Eros*, Peter Eisenman (1985).



Fonte: <https://www.pinterest.com/pin/465981892664575724/>, acesso: 13/03/2018.

Ostwald (2001) descreve o interesse de Eisenman nas formas fractais em um outro projeto, o *Choral Works*, desenvolvido com o auxílio do designer Jacques Derrida. Neste trabalho, as formas e composições de corais foram inseridas em princípios geométricos desenvolvidos com características da geometria fractal, como a escala,

auto-similaridade e a auto referência. O arquiteto referência este trabalho em projetos anteriores como a “*House 11<sup>o</sup>*” e o “*Moving Arrows, Eros and other Eros*”.

Mesmo com trabalhos significativos, como os de Eisenman utilizando das características da geometria fractal, Ostwald (2001) descreve que ao final da década de 1980 e início da década de 1990 os estudos que traziam conhecimentos matemático e teorias caóticas para arquitetura foram em parte abandonados. O autor comenta que algumas publicações começaram a incitar críticas a aplicação das formas fractais na arquitetura, referenciando-as como um vírus a infectar as tradicionais formas euclidianas. Como as apreciações feitas por Michael Sorkin<sup>3</sup> aos trabalhos de Coop Himmelblau<sup>4</sup>, e as críticas de Aaron Betsky<sup>5</sup> aos projetos de Eisenman. Estas depreciações começaram a trazer cinismo a utilização de padrões caóticos e geometrias complexas na arquitetura e urbanismo, questionando a relação da escala e problematizando a perspectiva humana.

Segundo Minucci e Librantz (2006), estudos como o de Batty e Longley (1994) e Frankhauser (1994), comprovaram que em geral as composições de cidades apresentam características fractais, demonstrando que certas propriedades dos fractais são as mesmas em diferentes padrões urbanos. Ostwald (2001) comenta que houve uma aceitação no uso das formas fractais a partir do ano de 1996, com a divulgação do livro escrito por Carl Bovil, “*Fractal Architecture and Design*”, no livro é relatada a utilização das características fractais como um instrumento para o desenvolvimento e projeto e sua aplicação em diversas formas e construções históricas.

Apesar das críticas recebidas durante a década de 1990, escritórios e arquitetos continuaram a utilizar as características fractais em diversos projetos. Como a empresa de arquitetura Ushida Findlay, que produziu uma série de projetos utilizando a geometria fractal e a sequência de

---

<sup>3</sup> Arquiteto e urbanista, cuja prática abrange design, planejamento, crítica e ensino, formado pela Universidade de Chicago em 1970 e mestrado em arquitetura pelo *Massachusetts Institute of Technology*. (MICHAEL, 2018).

<sup>4</sup> Coop Himmelblau (1968), é uma empresa cooperativa de projetos arquitetônicos que mantém escritórios em Los Angeles, Estados Unidos da América e Guadalajara e México. (COOPHIMMELBLAU, 2018).

<sup>5</sup> Aaron Betsky (1958), é crítico, curador, educador e escritor de textos sobre arquitetura e *design*. Diretor do Museu de Arte de Cincinnati, e atual decano da Escola de Arquitetura Frank Lloyd Wright. (THE JOURNAL OF THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS, 2016).

Fibonacci. Um dos projetos de destaque desta empresa é o projeto “S”, um plano urbano mestre para a cidade Tóquio, que compreende o percurso e um intercâmbio de transportes entre as linhas férreas da cidade. Desenhando a partir de uma linha principal que se ramifica em escalas menores, semelhante a característica fractal. (OSTWALD, 2001).

Recentemente, podemos citar projetos como o do Lab architectures, que desenvolveu o complexo do *Federation Square* (figura 34), em Melbourne, Austrália. Sua fachada apresenta características complexas e conceitos fractais, seus elementos são distribuídos em diferentes escalas e variações, utilizando triângulos por meio da auto-similaridade para modular e preencher a fachada. (LAB Architecture Studio, 2017).

Figura 34 – *Federation Square*, Lab architectures.



Fonte: <https://www.australia.com/pt-br/places/vic/fed-square.html>, acesso: 13/03/2018.

O *Grand Egyptian Museum*, desenvolvido por Heneghan Peng architects, utilizou das características do triângulo de Sierpinski em uma grande escala. Os elementos de fachada do trabalho foram gerados por meio de triângulos equiláteros, que sofreram recursivas iterações. A utilização dos triângulos e da característica fractal na fachada é para remeter a estrutura das pirâmides do Egito em uma visão contemporânea. (HENEGHAN PENG ARCHITECTS, 2018).

No *Victoria and Albert Museum* em Londres, o arquiteto Daniel Libeskind combinou conceitos fractais com outros matemáticos para desenvolver o que nomeou “*The Spiral extension*”. Os fractais estão presentes em todas as fachadas desta espiral em diferentes escalas e modificações, utilizando características como auto-similaridade. (STUDIO LIBESKIND, 2018).

Sedrez e Pereira (2009) descrevem uma lista de outros arquitetos que utilizavam características fractais em seus projetos, são eles: Asymptote, Charles Correa, Carlos Ferrater, Arata Isozaki, Christoph Langhof, Daniel Liebermann, Fumihiko Maki, Eric Owen Moss, Jean

Nouvel, Philippe Samyn, Kazuo Shinohara, Aldo e Hannie van Eyck, Ben van Berkel e Caroline Bos, Peter Kulka e Ulrich Königs e Eisaku Ushida e Kathryn Findlay.

Contudo, a utilização das características da geometria fractal nas composições arquitetônicas deve ser interpretada e avaliada de modo coerente. Joye (2006) afirma que mesmo as características fractais resultando em formas, detalhes e ornamentos com semelhanças naturais, nem toda construção com *design* orgânico é detentora das características fractais. Como a exemplo, construções que apresentam geometrias ou características de movimentos como o *free-forms*, não são construções com regras fractais. Um exemplo desta caracterização errônea é a interpretação do Guggenheim *Museum*, do arquiteto Frank Gehry's, como uma construção com características fractais. Mesmo apresentando curvas que remetem às formas natureza, ele não apresenta diferentes escalas de magnitude ou uma regra que norteie sua formação, não podendo ser considerada uma construção com características fractais.

Estes exemplos da aplicação e utilização da geometria fractal no campo da arquitetura demonstram que seu uso, consciente ou inconsciente, é um padrão empregado por arquitetos e designers na concepção de seus volumes e partidos. Revelando que o uso da geometria fractal está atrelado a diferentes componentes da arquitetura e locais nas construções, tendo caráter de ornamento, composição e ordem. Assim, pretende-se atribuir ao processo paramétrico diferentes características descritas neste subcapítulo, como: a utilização dos diferentes tipos de fractais lineares; a dimensão fractal; e a utilização da geometria como um elemento de ornamento e composição. De modo que estas premissas auxiliem na verificação dos consequentes comportamentos da utilização, organização e composição de elementos de fachada desenvolvidos através de padrões fractais.

## 2.4 FERRAMENTAS PARA APLICAÇÃO DA GEOMETRIA FRACTAL

Para aplicar as regras, características e iterações dos fractais, diferentes programas e métodos podem ser utilizados. Na pesquisa, optou-se pela utilização de um software de programação visual e plug-ins. No decorrer deste subcapítulo, são descritos os diferentes processos que podem envolver a utilização dos fractais. Discorrendo e explicando definições que compõem o trabalho, como processo paramétrico e processo generativo, além de exemplificar e expor o funcionamento do programa escolhido para o desenvolvimento da pesquisa.

Williams e Ostwald (2016) descrevem que conceitos e partidos, abstratos ou singulares, não tem a geração de sua forma de modo espontâneo à mente do projetista, o resultado final da construção depende de um processo de *design* e de uma plataforma vinculada para a sua concepção. E, para a construção de um projeto a partir de um conceito formal complexo, é necessário o desenvolvimento do mesmo em uma plataforma de trabalho por meio de uma metodologia coesa e correta.

Marcus Hernán (2006) afirma que a percepção de novas tecnologias na produção artística e de *design*, parte de resultados evolucionários, do desenvolvimento de novas interfaces e interações. O desbravar dos conhecimentos já implementados faz surgir, junto com novas ferramentas, profissionais capacitados a testar novos materiais, sistemas e métodos. Com o envolvimento destas tecnologias, atividades e estudos computacionais dentro da arquitetura e urbanismo, novas linguagens e funções foram permitindo corromper a rotina formal construída até o momento. Lima (2011) afirma que a arquitetura já pode ser compreendida como uma extensão proveniente da cultura digital, em que formas caóticas, que eram visualizadas apenas em representações cinematográficas ou artísticas, podem ser desenvolvidas por diversas tecnologias, diminuindo as possibilidades do que se imaginava não ser cabível de ser desenhado ou projetado.

A utilização dos processos em arquitetura que seguem preceitos naturais, como a morfogênese<sup>6</sup>, é possível por intermédio de programas e processos paramétricos e generativos. Pois, de acordo com Menges (2012), reproduzem algumas das principais funções da evolução natural, como a hereditariedade, reprodução recombinação genética, mutação e seleção natural. Cada uma destas características pode ser aperfeiçoada com o desenvolvimento de um domínio ou limite (fitness).

#### **2.4.1 Processos Paramétricos**

Gürbüz, Çağdaş e Alaçam (2010) comentam que o computador como ferramenta no processo de *design* trouxe para projeto, modos paralelos de aplicação. Estando presente na visualização, implementação

---

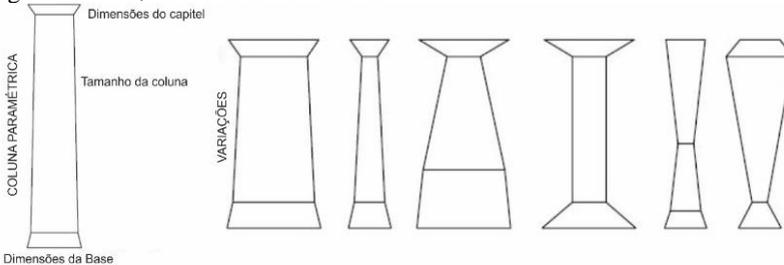
<sup>6</sup> Dentro dos processos e padrões naturais a sequência biológica para uma estrutura é denominada morfogênese. Os processos morfogênicos acontecem devido ao fato de que estrutura possui uma informação intrínseca e a capacidade de se adaptar e interagir com o entorno, criando organizações complexas de forma. (MENGES 2012).

de informação, e acarretando no enriquecimento do processo da gramática da forma e desenho paramétrico.

Nos modelos paramétricos é possível fixar atributos em suas propriedades, e alterá-los de modo que o modelo digital se reconfigure acompanhando estas modificações. Estas ferramentas são passíveis de diferentes variações, prevendo e reconfigurando mudanças dentro do projeto. Atualmente, os programas trabalham em plataformas de visualização tridimensionais fornecendo *feedback* ao projetista. E podem ser classificados de três maneiras: os modelos de variações paramétricas, os combinados e os híbridos. (HERNANDEZ, 2004).

O modelo de variações paramétricas (*PV, Parametric Variations*) é um padrão onde o designer cria a geometria e parametriza seus atributos como dimensões, características espaciais, etc. Estes parâmetros são dispostos em controladores, parte da visualização tridimensional desta geometria, e quando modificadas alteram a figura geométrica criando novos modelos sem a necessidade de se apagar e reiniciar a modelagem, como exemplificado pela figura 35. (HERNANDEZ, 2004).

Figura 35 – *PV, Parametric Variations*.



Fonte: Hernandez (2004), adaptado pelo autor.

No modelo paramétrico combinado, (*PC, parametric combination*), também descrito como modelo geométrico associativo (*associative geometry models*) ou modelo relacional (*relational model*), um conjunto de geometrias já desenvolvidas podem ser combinadas por meio de regras pré-determinadas, permitindo a visualização e criação de combinações de formas, conforme demonstrado na figura 36.

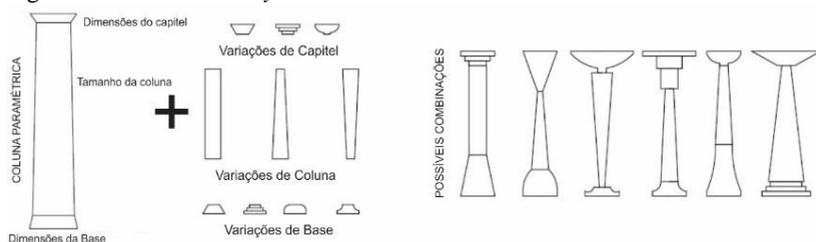
Figura 36 – PC, *parametric combination*.



Fonte: Hernandez (2004), adaptado pelo autor.

Estes dois modelos podem ser combinados gerando o modelo híbrido (*parametric hybrid models*) que contém as características dos dois modelos anteriores. Possibilitando parametrizar partes do modelo e aplicar diferentes combinações de peças modeladas, conforme apresentado pela figura 37. (HERNANDEZ, 2004).

Figura 37 – *Parametric hybrid models*.



Fonte: Hernandez (2004), adaptado pelo autor.

Salim e Burry (2010) descrevem outros dois grupos de *designs* paramétricos: os que utilizam de associações geométricas (*associative-geometry*) e associados às ferramentas BIM. A primeira descrição da parametrização é desenvolvida por meio de conceitos matemáticos, entre pontos, curvas, superfícies, sólidos, etc. As ferramentas que comumente utilizam estes padrões incluem a *Bentley Generative Components*, *Rhinoceros 3D* e *Grasshopper*. O segundo grupo, pertence às ferramentas que são focadas para a utilização multidisciplinar, em que parâmetros são desenvolvidos com relação a orientação dos objetos e representação, as ferramentas deste conceito de parametrização não fazem uso de NURBS para desenvolverem seus modelos, como o *Revit Architecture*, *Revit MEP*, *Revit Structure*.

Para os autores Salim e Burry (2010) a principal manipulação que os softwares paramétricos podem disponibilizar para o processo de design, está associado a linearidade de seu desenvolvimento, o IPO (*Input process and output*). Este processo difere dos comumente usados no

desenvolvimento de projetos por se tratar de uma progressão não linear. O desenvolvimento de processos paramétricos requer que a linearidade seja desvendada, pois em processos onde os *inputs* e *outputs* estão constantemente abertos, às diferentes tarefas e dimensões podem sofrer interações.

De acordo com Shea, Aish e Gourtovaia (2005) e Gerber (2007) para desenvolver as simulações, os *designs* paramétricos são facilitadores, podendo alterar e variar características geométricas e não geométricas do desenho de maneira rápida, construindo diferentes possibilidades e alternativas. Gerber e Lin (2013) afirmam que os modelos, que possuem características paramétricas, podem ser completados por outras ferramentas que potencializam as respostas das simulações, como os processos autômatos e o GenPOD (*generative performance oriented design model*). Ambos os processos podem explorar possibilidades, integrando outros processos e parâmetros para uma análise com diferentes variáveis. Contudo, uma interface com múltiplos resultados pode exigir uma equipe multidisciplinar para avaliar os problemas e soluções gerados durante as etapas de simulação.

#### **2.4.2 Processos Generativas**

Para Fischer e Herr (2000), com o aprimoramento da matemática, novas atribuições foram implementadas a diferentes funções, como o processo de descrever a natureza a partir de modelos. Processos generativos incentivaram o desenvolvimento de ferramentas que permitem esse entendimento, reproduzindo algumas das formas complexas da natureza. Fathy et al. (2015) descrevem que os processos generativos ampliam e aprimoram os limites da exploração do *design* das construções, por meio da designação de diferentes soluções que podem ser testadas e avaliadas. Estas diferentes possibilidades são uma ramificação de estudos como o: *performance design* e o *generative design*, integrados e otimizados com programas de simulação. Estes modelos integrados permitem organizar e construir diferentes soluções através de simulações e análises, possibilitando a criação de múltiplas respostas formais.

Os métodos generativos não geram o produto em si, eles constituem ferramentas que viabilizam diversas tarefas que resultam em produtos. Fischer e Herr (2000) descrevem quatro áreas emergentes que utilizam estas ferramentas: sistemas emergentes de auto organização; gramática da forma; algoritmos de geração e crescimento; e algoritmos de reprodução, evolucionários, genéticos e seletivos.

Os algoritmos genéticos (*genetic algorithms*) foram introduzidos por John Holland no ano de 1970. Os AGs são um método heurístico que tem capacidade de se refinar e avaliar uma numerosa quantidade de variáveis a partir de diferentes perspectivas globais e parâmetros. Este método é baseado na teoria da seleção natural, fundada por Charles Darwin, e atualmente adaptada para os computadores. (GERBER e LIN, 2013).

A utilização de tais modelos generativos está atrelada a uma série de motivos descritos por Fathy et al. (2015), como o processo de automação da construção na criação do modelo tridimensional; a exploração de diferentes possibilidades e capacidades do espaço; o design otimizado; a auto eficiência; a redução do tempo de trabalho; e a redução dos custos. Tais características, segundo os autores, podem ser procuradas não somente em plataformas baseadas em scripts, mas por modelos menos complexos e intuitivos.

Dentro deste envolvimento das ciências computacionais, com o campo da arquitetura, urbanismo e design, o desenvolvimento dos processos generativos acarretou em uma imprevisibilidade de novas formas. A inserção de regras em um determinado programa disponibiliza ou desdobra comportamentos em diferentes escalas que podem assumir novas formas plásticas ou visuais. O desenvolvimento destes códigos em diversas situações é contextualizado a partir de movimentações e crescimentos já conhecidos, como os de nuvens, plantas, etc. Pode-se citar arquitetos e escritórios que trazem em suas práticas profissionais aspectos generativos como a biomimética: Marcos Novak; Stephen Perrella; Lars Spuybroek; Greg Lynn; Kas Oosterhuis; Robert Neumayr; Bernhanard Franken; NIO Architecten. (LIMA, 2011; MACHADO, 1993).

#### **2.4.3 I.F.S (*iterated function system*)**

As composições generativas são aquelas em que os arquitetos ou demais profissionais, criam um processo, a partir de um conjunto de regras, por meio de uma ferramenta computacional. Estas composições generativas podem ser formadas por diferentes processos, como: celular autômato; gramática formal; L-systems; IFS; algoritmo genético; inteligência artificial. (CORCUFF, 2012).

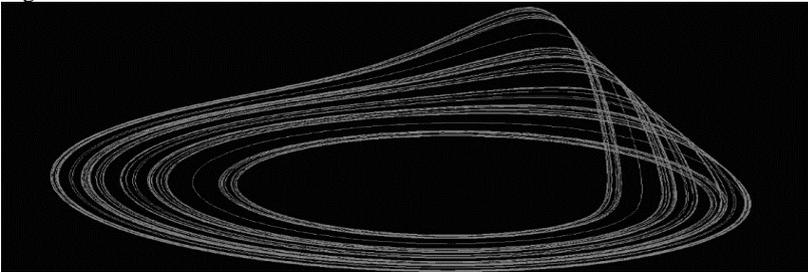
Minucci e Librantz (2006) comentam que a utilização das características dos fractais em diversas obras nas últimas duas décadas, foram resultado da ampliação dos sistemas de computação. Os processos de composição de geometrias, equações matemáticas e infinitas iterações puderam ser desenvolvidas de maneira em que não expressassem somente

resultados numéricos, mas também desenvolvessem composições gráficas não lineares. Essas aplicações voltadas para o campo do urbanismo podem ser compreendidas em estudos de escala urbana e crescimento, indicadores de violência, qualidade e evolução.

Segundo Hutchinson (1981) os fractais se formam a partir de iterações sequenciais, que transformam a geometria continuamente a cada iteração, construindo um processo repetitivo que pode se perpetuar infinitas vezes. Com IFS (*iterated function system*), sistema de função iterada, é possível observar as diversas iterações resultantes do uso da geometria fractal, pois a utilização deste sistema permite o afinamento de inúmeras transformações a partir de uma regra inicial. Para Corcuff (2012), o ISF possui uma capacidade relevante ao gerar formas fractais por meio da auto similaridade e pelo processo de diferentes iterações. Estes repetidos processos podem ser coordenados com características randômicas, e comandados em um determinado período de tempo.

Para Ibrahim e Krawczyk (2001), existem duas categorias em que os fractais podem ser divididos, do modo como é gerado a sua forma e modelo matemático que o compõe. A primeira categoria é a que estabelece como a forma fractal pode ser concebida, se divide em duas subcategorias, pelos diferentes vetores que o compõe e por suas diferentes coordenadas. O segundo conjunto é dividido em três diferentes subcategorias. Na primeira os fractais são gerados a partir de sistemas como IFS; no segundo grupo os fractais também são gerados a partir do IFS, mas ocupam múltiplas dimensões e são gerados por números complexos, como o conjunto de Mandelbrot e de Julia. No terceiro e último grupo, os fractais são gerados a partir de órbitas em duas ou mais dimensões, normalmente estão associados a teoria do caos, como o Lorenz Attractors, Rossler Attractors (figura 38), Henon Atractors, entre outros.

Figura 38 – *Rosler Attractors*.



Fonte: <http://www.chaotic-circuits.com/8-the-rossler-strange-attractor/>, acesso: 14/03/2018, adaptado pelo autor.

Barnsley, Hutchinson e Stenflo (2005) descrevem o IFS como um sistema que permite visualizar a forma em um determinado nível de iteração. Os autores comentam que a utilização do IFS pode ser constituída com uma variável descrita como *V-variable*, este elemento funciona da seguinte maneira, a cada iteração uma nova parte randômica substitui um elemento. Este novo elemento serve como padrão para a escolha randômica do próximo elemento, surgindo assim um padrão de formação complexo. A utilização do V dentro de um processo de IFS para o desenvolvimento de um fractal tem como modelo final um *superfractal*.

#### 2.4.4 Softwares

Os programas e a programação generativa são aqueles que utilizam alguma automação e códigos de criação potencializando a produtividade no campo da arquitetura. Essas programações podem ser criadas a partir de editores integrados a ferramentas de modelagem virtual, permitindo que profissionais, sem um profundo conhecimento de programação, desenvolvam códigos de maneira simplificada. O que difere o uso de modelos generativos para modelos tridimensionais tradicionais é a capacidade de se alterar e modificar a geometria. (STAVRIC, MARIANA, 2011; ISSA, 2013).

Para Ercan e Elias-Ozkan (2015), o desenvolvimento de programações paramétricas e generativas em trabalhos que envolvem simulações para construções, requer uma gama de habilidades para a construção desta programação. A formulação de uma área de trabalho personalizada (*workfloor*), pode requerer leitura, escrita, interpretação e manipulação de um banco de dados de um determinado programa. Porém, com o aprimoramento de novas interfaces e plug-ins, o desenvolvimento de programações paramétricas com interfaces *user-friendly* permitiu que profissionais usufríssem e explorassem ferramentas de simulação, sem a necessidade de especialistas ou programadores.

O desenvolvimento de ferramentas generativas e algoritmos genéticos depende de um conjunto de fatores que implicam em uma alta complexidade de cálculos e repetições. O desenvolvimento generativo consiste em atribuir valores a componentes, determinar limites (fitness), e indicar um objetivo final. Este processo na concepção de projetos em arquitetura se mostra vantajoso, pois o arquiteto pode manipular inúmeras ideias geradas sem que precise descartá-las. A utilização de algoritmos generativos permite o desenvolvimento de um conjunto de soluções que poderiam não ser alcançadas somente pela capacidade de intuição do

projetista e seus conhecimentos prévios. (ERCAN E ELIAS-OZKAN, 2015).

Salim e Burry (2010) comentam que este aumento da utilização das ferramentas paramétricas induz os arquitetos a quantificar e associar os componentes em seus projetos, facilitando o desenvolvimento de componentes generativos. O desenvolvimento destas variações paramétricas é auxiliado por softwares de programação visual, e através da troca de informações entre disciplinas este processo que inicialmente só variava a forma vem se aliando com códigos que alteram a linguagem e a eficiência da construção. Celani e Vaz (2012) comentam que atualmente pode-se criar um código paramétrico e generativo a partir de softwares que permitem a interpretação da programação visual, possibilitando o entendimento da linguagem de maneira mais rápida e sem possíveis frustrações, geralmente comuns a quem está aprendendo uma linguagem de programação escrita.

#### 2.4.4.1 Rhinoceros 3D e Grasshopper

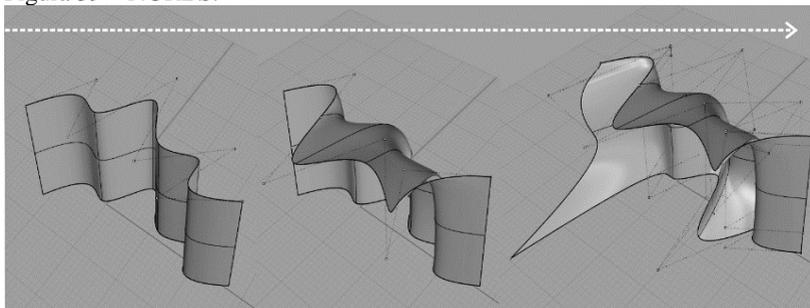
Celani e Vaz (2012) descrevem que o desenvolvimento de códigos a partir de *scripts*, (códigos escritos), pode ter diversas variações e termos, tornando-se uma desvantagem o uso de *scripts* para gerar códigos entre profissionais que não atuam diretamente com linguagens de programação. Quando se escreve uma programação deve-se seguir severamente a sintaxe exigida por ela, e em muitos casos, quando tem-se um erro, a localização deste torna-se difícil, pois não são automaticamente detectados, criando situações desencorajadoras no decorrer do processo.

As programações visuais VPL (*visual programming languages*) são organizadas e desenvolvidas a partir de elementos gráficos já existentes, que são movimentados, ajustados e conectados. Os VLP são organizados de maneira analógica, ajustando à programação por meio de caixas e fios (*box-and-wire*) interligados. Neste tipo de programação há uma série de fatores que permitem o manuseio de maneira fácil, como não declarar as variáveis e não utilizar de regras de sintaxe. (CELANI E VAZ, 2012).

Para a modelagem de processos generativos dentro do campo da arquitetura e *design*, um dos programas que apresenta aceitação para o desenvolvimento dos algoritmos é o plug-in *Grasshopper*, um editor gráfico conectado ao modelador Rhinoceros 3D. Que fornece uma gama de operações e comandos matemáticos e geométricos, podendo alterar o modelo digital construído. (KOLAREVIC, 2005).

O modelador Rhinoceros 3D é um software de modelagem comumente associado aos aplicativos de CAD, fabricação assistida por computador, prototipagem rápida, impressão 3D, engenharia reversa e compatível com o plug-in Grasshopper. Foi desenvolvido por Robert McNeel & Associates em 1980. A geometria do Rhinoceros 3D é baseada no modelo matemático NURBS (*Non uniform rational basis spline*), demonstrado pela figura 39. (RHINOCEROS, 2018).

Figura 39 – NURBS.



Fonte: O autor

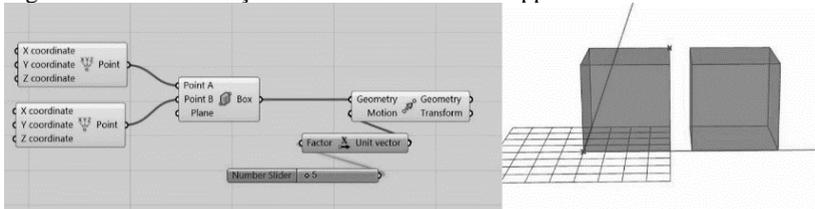
A ferramenta Grasshopper foi introduzida no software Rhinoceros 3D a partir de sua versão 4. A *interface* não requer profissionais especializados em programação para desenvolver suas regras. No software, é possível adicionar inputs, outputs, parâmetros e outras regras, em diferentes locais e estágios da programação, não estabelecendo limites para a criação destes componentes. (ERCAN E ELIAS-OZKAN, 2015).

A arquitetura de aplicativos do software é o SDK (*Software development kit*), com o código fonte aberto (*open source*), permitindo ao usuário personalizar a interface, criar comandos e menus personalizados. Existem dezenas de plug-ins disponíveis, tanto da McNeel como de outras empresas de software, que complementam e ampliam as capacidades do programa em campos específicos, como renderização e animação, arquitetura, engenharia, prototipagem. (ISSA, 2013; RHINOCEROS, 2018).

Segundo Sedrez, Meneghel e Celani (2013), o programa Grasshopper pode ser considerado um editor gráfico de algoritmos e uma ferramenta de programação que desenvolve representações análogas. O programa pode ser instalado no software Rhinoceros na forma de um plug-in, permitindo descrever visualmente as relações entre diferentes objetos, sem a necessidade de escrever um código e de dominar

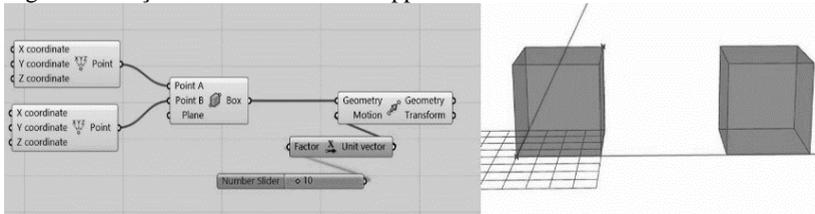
conhecimentos prévios de programação. O ambiente que constitui o programa é formado por uma segunda tela, que funciona juntamente com a do programa Rhinoceros 3D, e atua interativamente com o modelador tridimensional, no qual o usuário pode inserir e conectar componentes utilizando fios. Estes componentes funcionam de modo semelhantes a comandos, em que recebem uma informação do lado esquerdo, e a transmitem para o lado direito com determinada ação ou função, como demonstrado pelas figuras 40 e 41. Estes dados transmitidos são repassados para diferentes componentes em uma sequência lógica, e podem ser sólidos, números, listas, geometrias, valores, textos, etc.

Figura 40 – Demonstração da interface do Grasshopper com o Rhinoceros 3D.



Fonte: O autor

Figura 41 – Ação interface do Grasshopper com o Rhinoceros 3D.



Fonte: O autor

Para o desenvolvimento das diferentes iterações dos componentes fractais foi utilizado um add-on (um plug-in), pois o Grasshopper não possui sistema de recursão nativo, optando-se assim, pelo HoopSnake, que permite a repetição de um processo inúmeras vezes, e estas podem ser definidas pelo usuário. De acordo com Sedrez, Meneghel e Celani (2013) este complemento permite recriar uma cópia de uma determinada informação, armazená-la no componente, e transmitir uma outra cópia do que está armazenado para outros processos.

Para a construção do modelo almejado neste trabalho, pretende-se utilizar as ferramentas computacionais mencionadas neste subcapítulo, de modo que o processo seja parametrizado em suas diferentes etapas de

construção. Pretende-se utilizar os softwares Rhinoceros 3D e Grasshopper como plataformas principais, além de *plug-ins* complementares para estes programas, como o IFS (*iterated function system*) para desenvolver as diferentes características da geometria fractal.

## 2.5 MODELO PARA A CONSTRUÇÃO DO PROCESSO PARAMÉTRICO

Com a definição das ferramentas para o desenvolvimento e inserção das características da geometria fractal no processo, diferentes modelos de construção foram analisados, optando-se pelo Modelo Interativo Incremental (MII) para o desenvolvimento do processo dentro da plataforma Rhinoceros 3D e Grasshopper. Neste subcapítulo, serão apresentadas algumas informações pertinentes para o entendimento do modelo especificado, como *Digital Thinking* e o *Performance Model*, além de um detalhamento do funcionamento do MII.

Para Gürbüz, Çağdaş e Alaçam (2010) o papel da computação no processo do design arquitetônico pode ser considerado o de um conhecimento prévio, auxiliando os projetistas a alterar seus métodos de desenvolver o partido. Uma opção é modificar a utilização das ferramentas computacionais trazendo-as para as diversas etapas de trabalho por meio do design digital. Oxman, Hammer e Ari (2007) e Mitchell (2005) descrevem que o conceito do *design* digital dentro da arquitetura e urbanismo veio com a quebra da padronização das tipologias, conhecimentos e programas utilizados. A implementação de conceitos que antes eram desenvolvidos de modo manual e agora estão no meio digital, permitiu que arquitetos se aproximem de seus modelos, tendo controle sobre o seu entorno e outras variáveis, por meio de simulações tridimensionais de espaço.

### 2.5.1 Digital Design Thinking

Práticas profissionais decorrentes do uso de novas técnicas, softwares e métodos, fazem com que escolas de arquitetura moldem seus conceitos educacionais, trazendo ao mercado de trabalho profissionais com habilidades e conhecimentos distintos. Estas aplicações dentro da academia e as adaptações sugeridas pelo mercado, fazem com que os profissionais desenvolvam um pensamento digital a respeito dos métodos de arquitetura, que pode ser denominado como *digital design thinking*. (OXMAN, 2006 e 2008).

Para Oxman (2006), a utilização de práticas como o *design* digital, acarretou em novos resultados e modelos dentro do campo da arquitetura, do *design* e das artes. Com a apropriação deste pensamento e das ferramentas para o seu desenvolvimento, fez-se necessária a reavaliação dos métodos e teorias existentes em algumas etapas de criação. Esta linha de pensamento também é discutida por diversos autores, como Tim Brown<sup>7</sup>, podendo apresentar características diferentes em campos e especialidades.

Com a inserção do *digital design thinking* e instrumentações digitais, a capacidade para gerar novas formas foi o que diferenciou seus resultados dos que eram constituídos por representações manuais. Este leque de novas possibilidades desenvolveu os processos geométricos das formas livres (*free forms*), caracterizados pela utilização de formas complexas, matemáticas e híbridas. (OXMAN, 2006).

Um ponto marcante, da caracterização destas novas geometrias, foi o desenvolvimento e construção do projeto do Guggenheim Museum na cidade de Bilbao, Espanha, pelo arquiteto Frank Gehry. O projeto apresenta uma complexidade de formas que até então não eram comumente aplicadas na arquitetura. Projetos como este, que surgiram pela adesão dos arquitetos as formas livres, ampliaram a colaboração interdisciplinar entre engenheiros e arquitetos, aumentando a produção de novas tecnologias voltadas ao desenvolvimento geométrico e compatibilização de projetos. (OXMAN, 2006 e 2008).

## 2.5.2 Performance Model

O conceito do *design* digital dentro do campo da arquitetura e urbanismo, teve início a partir da quebra da padronização das tipologias e programas arquitetônicos conhecidos. Por meio da transformação de um processo feito de modo manual, para um meio digital. Esta aproximação das construções para um desenvolvimento digital, deixou os responsáveis pelo projeto mais próximos do modelo que estão desenvolvendo, permitindo que os mesmos façam modificações, simulem tridimensionalmente o espaço, entre outras ações. (OXMAN, 2006; MITCHELL, 2005).

Dentro das metodologias estruturadas para o design digital, o centro do desenvolvimento do processo é posto na figura ilustrativa do

---

<sup>7</sup> Tim Brown é presidente e CEO da IDEO, uma empresa internacional de design e consultoria e inovação. Fonte: < <https://www.ideo.com/people/tim-brown> >. Acesso: 12/08/2017

projetista, que controla quatro funções durante o processo: representação; geração; validação; e performance. A figura dele caracteriza, em determinadas funções, um link direto entre estes processos, controlando a comunicação entre eles ou repassando funções de um para outro. Este método é atribuído a uma linha de projetos tradicionais, em que as ferramentas digitais são utilizadas unicamente como ferramentas de desenho e representação, *paper-based model*, (figura 42).

Figura 42 – *Paper-based model*.



Fonte: O autor baseado em Oxman (2006)

Diferentemente, o *performance model*, utiliza de uma sequência em que a validação da simulação é feita antes do processo de geração da forma, como demonstrado pela figura 43. Segundo Salim e Burry (2010), o método pode variar, pois a entrada e saída de informação dentro dos modelos paramétricos são livres, sendo capaz de se modificar e ordenar novas sequências para o processo. Oxman, Hammer e Ari (2007) afirmam que os modelos e metodologias de processo dentro da linha do *design* digital podem ser alterados, dependendo da mídia e do design utilizados.

Figura 43 – *Performance model*.



Fonte: O autor

O *performance model* é descrito por Oxman (2006, 2007 e 2008) como uma nova visão, em que é possível criar a partir de simulações, as quais se utilizam de ferramentas computacionais atuais, como as generativas e paramétricas, e permitem considerar aspectos da construção como forças físicas, ventos, energia, iluminação e estrutura.

Para ambas metodologias é necessário, inicialmente, desenvolver o partido e o conceito, para assim desconstruir o partido, analisando os principais aspectos e características que influenciam os resultados métricos, estéticos, custo, fatores ambientais e sociais. Esta desconstrução é feita também para hierarquizar o projeto, fazendo com que durante a construção do processo, sistemas e subsistemas sejam criados com partes relacionadas, permitindo ao projetista, em alguns casos, quebrar esta hierarquia e reorganizar a programação. Com os elementos organizados e parametrizados, inicia o processo e os testes em loops, refinando-os a cada interação. (RASHAD e ALFARIS, 2010).

### **2.5.3 M.I.I (Modelo Iterativo Incremental)**

Como o trabalho parte da ideia do desenvolvimento de processo paramétrico, optou-se pela utilização de um método que possibilita a construção de uma programação baseada nos métodos aplicados na engenharia de software. Porque, mesmo que o programa escolhido para se desenvolver o processo não se organize por meio de códigos escritos, as habilidades necessárias para o seu manuseio possuem semelhança com os processos lógicos da programação em códigos.

Segundo Azevedo Junior e Campos, (2008) e Pressman (2016), dentro do campo da engenharia de software há um conjunto de métodos, técnicas e ferramentas que possibilitam aos profissionais desenvolverem softwares para diferentes fins.

Pressman (2016) comenta que existem sete grandes categorias de softwares dentro da área da engenharia de softwares. Estas se dividem em: softwares de sistemas; softwares de aplicação; softwares científicos de engenharia; softwares embutidos; softwares para linha de produtos; softwares aplicados para a web; e softwares de inteligência artificial. O processo pode ser inserido dentro de duas destas categorias: dos softwares embutidos, pois a programação será residente em um outro produto ou sistema, e terá suas características finais controladas por um usuário; e na linha de produtos, em que a programação é pensada em clientes diferenciados e focada em um mercado particular.

Visto que a programação pode ser enquadrada na área de engenharia de softwares, o método escolhido foi encontrado dentro de um modelo de software evolucionário<sup>8</sup>, o Modelo Iterativo e Incremental,

---

<sup>8</sup> Tem como base a ideia de desenvolver uma implementação inicial, e interagir ativamente com o cliente de modo a fazer seu aprimoramento por meio de muitas

(MII). Segundo Silva e Videira (2001), o modelo é aperfeiçoado com o decorrer de sua programação. São desenhadas partes da programação, sem a utilização de um processo formal de desenvolvimento, permitindo que o usuário tenha uma série de avaliações do modelo sem que o mesmo esteja finalizado. Segundo Pontes, Aleixo e Minora (2007) a iteração que dá o nome a metodologia é o resultado de uma série de mini projetos, ou versões do sistema que são aperfeiçoadas em comparação com a versão anterior.

O MII foi escolhido por apresentar vantagens em seu uso, além de que esta metodologia permite a visualização e verificação das etapas prontas do modelo antes da finalização total da programação. Assim, os testes fornecem um feedback para o projetista em diversas etapas da programação, evitando que sugestões e mudanças importantes sejam recebidas somente na conclusão do desenvolvimento. Outro ponto positivo deste método, é que ele permite o aprendizado da linguagem que está sendo utilizada, pois possibilita a concentração nas etapas mais simples da programação, oportunizando a adaptação e a interpretação da linguagem escolhida. (BONA 2002).

O modelo iterativo e incremental é dividido em quatro etapas organizadas em uma sequência de atividades. Segundo Cantor (1998) e Bona (2002) o início de uma etapa posterior não necessita que a etapa anterior tenha sido completamente finalizada, fazendo com que o projeto avance, mesmo que algumas etapas anteriores precisem de novas validações. Os autores dividem as quatro etapas em: concepção, elaboração, construção e transição.

1. Concepção: definir a compreensão inicial de acordo com uma predefinição do produto, nesta fase são revistas as principais informações de projeto.
2. Elaboração: alcançar a forma, (compreensão), inicialmente acordada no trabalho. Desenvolver o que é necessário para se ter o produto final.
3. Construção: é iniciada a compilação do produto, nesta mesma fase são realizadas as principais codificações do sistema e tarefas referentes à análise e projeto.
4. A transição: ocorre a entrega do produto e se verifica o atendimento dos objetivos inicialmente planejados. Nesta

---

versões até que um sistema adequado tenha sido desenvolvido. Fonte:<<https://www.linux.ime.usp.br/>>. Acesso: 10/05/2017.

última etapa também são executados os ajustes finais do modelo.

Para a elaboração do processo desta pesquisa alguns dos conceitos comentados neste subcapítulo foram utilizados. Para desenvolver e aplicar o processo paramétrico em uma plataforma de programação visual, busca-se utilizar um modelo semelhante ao *performance model*, mas com algumas modificações. E para gerar este modelo, a sequência lógica da sua construção pretende utilizar o MMI, com o intuito de que, durante ao seu uso, os conhecimentos nas plataformas utilizadas sejam aprimorados, potencializando o uso dos *softwares*.

## 2.6 COMPORTAMENTO LUMÍNICO E SIMULAÇÕES

Este subcapítulo apresenta conhecimentos referentes ao comportamento da luz natural, seus diferentes índices de medição, meios de simulação, e os softwares responsáveis por isso. Estas abordagens são fundamentais para o corpo teórico do estudo, pois as características que irão organizar e avaliar a composição dos elementos de fachada são a radiação solar e o comportamento lumínico do ambiente.

Com a criação de movimentos como o nZEB'S (*nearly zero energy buildings*), em países da União Europeia, a utilização de simulações e técnicas para prever o comportamento da luz natural nos ambientes e o ganho térmico dela proveniente vem ampliando expressivamente em projetos. Técnicas e softwares são constantemente empregadas na utilização e construção de elementos de fachadas, a fim de potencializar o uso da iluminação natural. (ZUHAIB et al., 2016; COM, 2016).

As fachadas podem receber modificações e diferentes *designs*, sendo desenvolvidas e adaptadas considerando o ambiente do entorno, o conforto do usuário e o consumo de energia elétrica. Contudo, o desenvolvimento e performance dessa fachada estão atrelados diretamente às propriedades estéticas e físicas, e podem agregar fatores climáticos, lumínicos, estruturais, históricos, localização, durabilidade, entre outras. Como exemplo tem-se a renovação de fachadas de prédios já existentes, em que pode-se diminuir em até 75% o consumo de energia em consequência do resfriamento, luz e ventilação. (ZUHAIB et al., 2016; SHNAPP; SITJÀ; LAUSTSEN, 2013).

### 2.6.1 Elementos de Fachada

As aberturas são elementos arquitetônicos sensíveis às variações climáticas e de suma importância nas construções, pois por meio delas admite-se diferentes fatores que podem alterar uma série de ações de controle e admissão, como luz, vento, poluição, calor, etc. Um destes condicionantes é a iluminação natural, uma forma eficaz de diminuir o consumo de energia elétrica por meio da redução do uso da iluminação artificial. Contudo, acompanhando a luz, existem fatores que não são desejáveis, como o aumento da carga térmica na construção e consequentemente, a exigência de uma demanda maior de energia elétrica para a climatização. (FELLIPPE, 2016).

A exploração dos potenciais da luz natural é mencionada principalmente pelo seu efeito em reduzir o consumo de energia elétrica por meio da diminuição das fontes artificiais. É fundamental que o usuário tenha suas necessidades sanadas pelo equilíbrio entre a eficiência térmica, conforto do ocupante e uso da energia elétrica na construção. Inúmeras propostas podem ser adotadas e planejadas para a otimização da luz natural, e estas, por consequência, alteram o *design* da construção. (NABIL; MARDALJEVIC, 2006; REINHART; WIENOLD, 2011).

Uma estratégia para controlar condicionantes naturais externas, por meio das aberturas, é o emprego de elementos de sombreamento (como os *brises*), que controlam a entrada da radiação solar por meio de sua geometria, angulação e refletância. Pois, mediante o uso destes elementos, é possível selecionar a luz que incide sobre fachadas e distribuí-la para os locais mais distantes da abertura, além de reduzir o nível de ofuscamento. Há a possibilidade de instalar estes protetores solares em diferentes pontos da abertura, podendo ser internos, externos, fixos, manuais, mecânicos e automatizados. Estes dispositivos tendem a garantir um comportamento seletivo da luz, pois são ajustáveis e projetáveis, permitindo que a luz atravesse os ambientes somente em horários específicos. (FELLIPPE, 2016).

De acordo com Segre, Vilas Boas e Leitão (2010), os primeiros elementos de proteção solar apareceram durante o século XX, nas décadas de 1930 e 1940, em projetos modernistas. Como nas residências em Cartago e habitações populares na Argélia e em Barcelona, projetadas por Le Corbusier, e que apresentarem o elemento arquitetônico *brise-soleil*. Cunha (2011) comenta que a utilização dos *brises* tem uma importância considerável na seleção da luz natural de uma edificação. Além das características que proporcionam o conforto visual e ganho térmico, estes elementos podem compor o edifício, fazendo com que a forma dos

protetores solares, como uma estrutura, seja alterada com o uso de diferentes materiais e tecnologias, transformando-os em um elemento de valorização e dinamização compositiva.

## 2.6.2 Simulações dinâmicas

Nas últimas décadas, medições e simulações do comportamento da luz natural estão recebendo maior importância devido a utilização de seus resultados em certificados de eficiência, como o BREEAM (*BRE Environmental Assessment Method*), LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), *UK Green Building Council and Green Star*, entre outros. Segundo Mardaljevic, Heschong e Lee (2009). Para conquistar algumas destas certificações, é necessário seguir determinadas recomendações e demonstrar resultados através de simulações.

De acordo com Mardaljevic, Heschong e Lee (2009) às condições da luz natural são dinâmicas e estão associadas à distribuição espacial e temporal, compostas por duas variáveis, a iluminação proveniente do sol, (*daylight*) e a do céu, (*skylight*). Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006) sugerem que os índices resultantes do uso de simulações dinâmicas podem ser analisados por profissionais que não possuem notório saber sobre simulações ou comportamento da luz. Uma vez que alguns dos resultados destas simulações possibilitam identificar de forma relevante o comportamento da luz natural, permitindo se avaliar um ambiente ou enquadrá-lo em certificação.

Mcneil e Lee (2013) descrevem que as simulações dinâmicas são feitas por meio da análise da radiação diurna. Uma das ferramentas que utiliza essa abordagem de simulações anuais, desenvolvida pelo DAYSIM (*advanced daylight simulation software*), divide o céu em 145 partes e relaciona cada iluminância provinda de uma das divisões do céu para um ponto dentro do espaço, esta relação foi denominada de *Daylight Coefficients*.

A IES LM-83-12 (2013) faz uma série de recomendações na utilização dos modelos 3D das simulações dinâmicas. Tais como: definir tridimensionalmente detalhes arquitetônicos; dimensionar corretamente os módulos que serão avaliados; especificar o entorno externo de maneira correta; avaliar características como reflexão, número de vezes em que a luz irá refletir no ambiente, *ambiente bounces* (saltos no ambiente); entre outros. Recomenda-se que os valores de reflexão modelados no ambiente interno sejam designados a partir do material e cor utilizados, tendo como base os índices de reflexão como: chão 20%, paredes 50%, teto 70% e

para o mobiliário 50%, para o *ambiente bounces* é recomendado ao menos seis ciclos de reflexões.

### 2.6.3 Índices lumínicos

Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2006) descrevem que a luz ideal pode ser interpretada diferentemente por distintos profissionais e áreas, tais como: arquitetura, economia, custo, gerenciamento de carga e consumo de energia. Isto posto, a performance lumínica de um ambiente têm variados entendimentos, dificultando sua validação. Segundo Boyce (1996) não existe uma relação comprovadamente eficaz entre os níveis de iluminação e uma melhora no desenvolvimento da performance de trabalho (*task performance*) e a performance visual (*visual performance*). Pois, para realizarmos diferentes tarefas, são necessários três componentes: o visual (onde extraímos a informação), o cognitivo (onde interpretamos as informações visuais) e o motor (com que executamos a ação). Comprovando isto, a IESNA (1993) apresentou os valores de iluminação recomendados em diferentes edições da IES (*Illuminating engineering Society*), ao longo da história americana, demonstrando que as demandas por iluminação acompanham tendências econômicas, energéticas tecnologias e políticas. Segundo Vine et al. (1998) existem evidências de que os usuários apreciam locais onde as aberturas, além de proporcionar a entrada de luz natural, ainda apresentem uma vista para o ambiente externo e não apresentem ofuscamento.

Contudo, esta pesquisa não tem o intuito de interpretar o conforto lumínico dos ocupantes, e sim interpretar o comportamento da luz consequente da utilização dos protetores solares com características da geometria fractal. Assim, diferentes índices lumínicos foram anexados a distintas partes do processo paramétrico, permitindo caracterizar a eficiência lumínica do ambiente por meio de simulações de desempenho dinâmico, como: *Spacial daylight autonomy* (SDA); *anual sunlight exposure* (ASE) e o *useful daylight*. Para a análise da admissão da radiação solar foi utilizado o coeficiente de admissão de controle da luz solar (CARS). (MATOS et al. 2007; FELLIPPE, 2016; CARTANA; PEREIRA, 2016).

#### 2.6.3.1 Spacial Daylight Autonomy

A IES LM-83-12 (2013) descreve dois critérios aprovados pela instituição para avaliar a luz solar em simulações dinâmicas: o SDA e o ASE. O primeiro critério, o SDA (*spacial daylight autonomy*), é descrito

como a porcentagem do espaço que atinge a iluminância da luz natural de 300 lux em 50% das horas de utilização do ambiente, em um período de um ano. Sua avaliação é feita, em média, durante 10 horas por dia, totalizando 3650 horas de análise, dependendo do arquivo climático.

Este índice apresenta dois critérios para avaliar a qualidade do ambiente, o *preferred* e o *nominally accepted*. Para que um ambiente esteja no critério *preferred* (ou *favorably*), os resultados do sDA precisam superar 75% da área do ambiente, e para estar dentro do *nominally accepted* (ou *neutral*), os resultados têm de ser superiores a 55% do ambiente. (IES LM-83-12, 2013).

#### 2.6.3.2 Anual Sunlight Exposure

O segundo critério recomendado pela IES LM-83-12 (2013), o ASE (*annual sunlight exposure*), identifica locais que podem gerar desconforto devido a incidência direta da luz solar. Estes locais são definidos pela porcentagem da área do ambiente em que os níveis de iluminância, produzidos pela luz direta do sol, excedem um limite específico de 1000 lux em mais de 250 horas por ano, considerando as mesmas 3650 horas analisadas do sDA.

Os índices de aceitação do ASE são descritos como *unsatisfactory*, *nominally accepted* e *accepted*. Ambientes que ultrapassam 10% de sua área são considerados *unsatisfactory*. Espaços onde os índices são inferiores a 7% são descritos como *neutral* ou *nominally accepted*, e ambientes onde o índice é inferior a 3% são considerados como *accepted*. (IES LM-83-12, 2013).

#### 2.6.3.3 Useful Daylight Illuminance

O *Useful Daylight Illuminance* (UDI) é um índice dinâmico que fornece o entendimento dos níveis de iluminação do ambiente e um indicativo dos níveis não aproveitáveis por iluminâncias baixas ou em excesso. O índice identifica espaços que possuam uma faixa útil que compreende valores entre 100 e 2.000 lux. As medições do UDI implicam em três resultados, a porcentagem do espaço que apresenta níveis menores que 100 lux, a porcentagem dos locais identificados como ideais, entre 100 lux e 2000 lux, e por último, o percentual da área que se encontra acima de 2000 lux, e que pode gerar incômodo para alguns usuários. (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006).

De acordo com Nabil e Mardaljevic (2006) a utilização do UDI pode proporcionar uma redução na quantidade de dados a serem

analisados e gerados em simulações que compreendam o uso da luz diurna. Os autores comentam que com os dados gerados pelo UDI é possível verificar não só os locais onde há pouco proveito da iluminação natural, mas também os locais onde a luz pode estar excessiva e gerar desconforto visual.

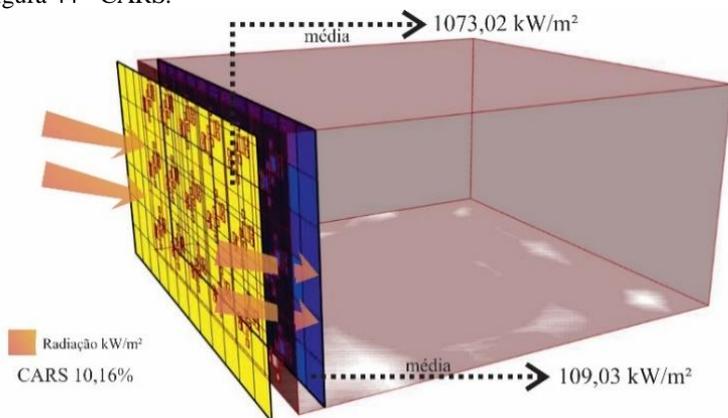
Ainda assim, estudos feitos por Mardaljevic (2015) mostraram que o UDI pode ter uma faixa de tolerância ampliada para altas quantidade de luz, podendo considerar um intervalo entre os 300 lux e os 3000 lux. A explicação para este aumento na tolerância está na mudança dos tipos de monitores utilizados em ambientes de trabalho. Com o final da década de 1990 e 2000 as telas curvas e de material reflexivo, que geravam maior ofuscamento, foram sendo substituídas por telas planas e com novos materiais.

#### 2.6.3.4 Coeficiente de admissão da Radiação Solar Incidente

Para analisar a relação de admissão da radiação solar, foi utilizada uma medida comparativa percentual de admissão da radiação solar incidente, com e sem o emprego dos elementos de controle solar, denominada de coeficiente de admissão da radiação solar incidente (CARS), expresso em porcentagem. As simulações dinâmicas para este índice são dadas em  $Wh/m^2$  e consideram como critério de eficiência a capacidade de admitir menos radiação através da utilização de elementos de fachada. (CARTANA, PEREIRA e BERTE, 2016; CARTANA; PEREIRA, 2016)

O CARS pode ser caracterizado como a razão entre a quantidade de energia solar que atravessa determinada abertura, pela quantidade de energia solar que incide sobre esta superfície, estabelecendo esta razão em uma porcentagem. Este coeficiente pode ser calculado com base na medição da radiação incidente em dois planos, o primeiro onde a radiação incide sem nenhuma obstrução, e o segundo que recebe somente a parte não bloqueada desta radiação. A figura 44 ilustra este parâmetro. (CARTANA, PEREIRA e BERTE, 2016; CARTANA; PEREIRA, 2016).

Figura 44 - CARS.



Fonte: O autor

#### 2.6.4 Software de Simulação

O desenvolvimento de modelos de fachadas é auxiliado por ferramentas computacionais que podem estar associadas à forma, material, número aberturas, ventilação, entre outros. Mas existem aspectos críticos que o arquiteto tem de levar em consideração na construção de elementos de fachada, como o aspecto estético, visual e funcional. A tabela 5 demonstra a utilização de plataformas para desenvolver a *design* e elementos de sombreamento para fachadas. Nesta tabela observa-se a utilização da plataforma Rhinoceros 3D, junto com os plug-ins Grasshopper e DIVA em algumas situações. (SHI; YANG, 2013; ZUHAIB et al., 2016).

Tabela 5 – Diferentes programas de simulação e seus usos.

<b>Designação da função</b>	<b>Programas de simulação</b>
Forma geometria e configuração	TRANSYS, GenOpt
	DOE - 2
	Rhino + Grasshopper, DesignBuilder, MATLAB, Radiance
Aberturas	Fast Fluid Dynamics
	Rhino, Grasshopper, Ecotect
	GenOpt, IDA ICE 4.5
Protetores e luz natural	DAYSIM, EnergyPlus, Rhino & DIVA
	Rhino + Grasshopper, DIVA, Galápagos, Radiance
	EDSL Tas

Fonte: Zuhaib et al. (2016), adaptada pelo autor.

#### 2.6.4.1 DIVA

O plug-in escolhido para fazer as simulações dinâmicas foi o DIVA-for-Rhino. O plug-in DIVA foi selecionado por ser compatível com a plataforma Rhinoceros 3D e pela facilidade em utilizar a mesma interface de modelagem para fazer as simulações, evitando que o arquivo tenha que ser transportado para outro programa. Outro fator que influenciou a escolha do software é a sua alta capacidade de performance utilizando as estruturas do RADIANCE, DAYSIM e EnergyPlus. (EMAMI; KHODADADI; VON BUELOW, 2014).

O plug-in DIVA (*Design Iterate Validate Adapt*) possibilita a realização de diferentes simulações por meio dos softwares RADIANCE, apresentando erros abaixo de 2% na análise das autonomias da luz natural. (FONSECA, 2015; PEREZ et al., 1990).

Os valores dos parâmetros controláveis do componente DIVA podem ser alterados manualmente ou de maneira automática, influenciando diretamente os resultados das simulações. Uma amostra destes parâmetros são os *ambientes bounces* (ab), que determinam o número de inter-reflexões calculado pelo programa. Caso este número seja submetido a valores baixos, os resultados gerais da iluminância podem ser interrompidos antes do fluxo luminoso total ser considerado. Na sequência, alguns destes parâmetros serão explicados visto que sua interpretação é fundamental para entender os resultados das simulações.

Parâmetros como o *Ambient Bounces* (Ab); *Ambient Accuracy* (Aa); *Ambiente Resolution* (Ar); *Specular Threshold* (St); *Direct Sampling* (Ds); e *Direct Relays*, (Dr). (FELLIPPE, 2016).

#### 2.6.4.2 Parâmetros do DIVA

Nos componentes de simulação do DIVA, existe uma série de parâmetros que podem ser alterados manualmente ou automaticamente e podem interferir no resultado final da simulação. Além das especificações apresentadas neste tópico, o programa apresenta outras que não são alteradas com a mudança de qualidade do componente, sendo elas: *ambiente division*, (Ad); *ambiente super-samples*, (As); *limit reflection*, (Lr); e *limit weight* (Lw).

O *ambiente bounces* (Ab) determina o número de inter-reflexões entre as superfícies que o programa calcula, caso o número de Inter-reflexões designado seja baixo o programa tenderá a subestimar os níveis de iluminância, pois o cálculo é interrompido antes de todo o fluxo luminoso ser considerado. O parâmetro *Ambient Accuracy* (Aa) é o erro máximo (expresso em fração) permitido na interpolação da irradiância indireta. O padrão para a sua utilização é de 0.1 (erro máximo de 10%). A *Ambient resolution* (Ar) está relacionada à precisão do ambiente, o tamanho da cena e o ponto de corte no qual a amostragem hemisférica cessa e a interpolação começa, valores entre 128 e inferiores a 512 são recomendados por fornecerem simulações com resultados precisos e tempo de simulação aceitáveis. O valor de *Specular Threshold* (St) é a fração mínima de reflexão ou de transmissão em que não é realizada a amostragem especular. O *Direct Sampling* (Ds) prevê que uma fonte de luz será subdividida até que a largura de cada área de amostra seja dividida pela distância do ponto iluminado, isso garante precisão em regiões próximas a grandes fontes de iluminação, tendo um pequeno custo de cálculo. O último parâmetro descrito, o *Direct Relays* (Dr), refere-se ao número de transferências para fontes secundárias, podendo variar entre os valores de 0 a 2, dependendo das fontes consideradas. (JAKUBIEC e REINHART, 2011; FONSECA, 2015).

### 2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com este último apanhado de informações pertinentes ao comportamento da luz, finaliza-se o traçado teórico proposto por esta pesquisa com diferentes recursos informativos que auxiliarão na construção do processo paramétrico. Do conjunto de assuntos

acumulados neste capítulo, diversos tópicos serão utilizados e conectados para a idealizar as etapas do processo, como: a identificação, desenvolvimento e organização de padrões fractais lineares para modelar diferentes painéis; a utilização da dimensão fractal para se obter uma configuração ideal para a composição destes painéis; a aplicação destes elementos de fachada em uma construção; os modelos, métodos e softwares cabíveis de serem utilizados para o trabalho; os processos consequentes da utilização destes programas e o pensamento lógico para o seu manuseio (processos paramétricos e generativos, e ferramentas como Rhinoceros 3D, Grasshopper e IFS); o modo de construção desta lógica (*Digital Design Thinking*, *Performance Model* e Modelo Iterativo Incremental); e os índices e o programa para avaliar o seu comportamento luminoso.

Estes conhecimentos foram necessários para compreender os diversos conteúdos teóricos pertinentes a pesquisa, pois ampliaram as habilidades lógicas no manuseio dos programas e plug-ins utilizados. O uso desta síntese teórica para compor o traçado lógico da construção do processo é descrito no capítulo seguinte, que aplica este corpo teórico a fim de desenvolver e organizar elementos de fachada com características da geometria fractal.



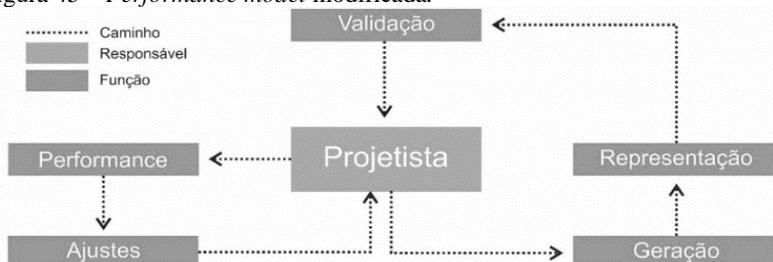
### 3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO E RESULTADOS DO PROCESSO

O presente estudo mostra a construção de um processo paramétrico que envolve diferentes métodos e conceitos resultando em um compilado de procedimentos unificados, que podem ser utilizados por demais pesquisadores, com o intuito de aplicar as características fractais em diversos processos do *design*, criação e avaliação. A sequência lógica resultante foi desenvolvida a partir dos conhecimentos descritos nos capítulos anteriores, tendo como base as noções das características básicas dos fractais, os potenciais métodos e softwares para o seu desenvolvimento e os possíveis índices para validação do resultado do trabalho.

O processo do trabalho apresenta sequências lógicas e cronológicas, podendo ser fragmentado em quatro grupos: implementação de um modelo paramétrico de um ambiente; criação e escolha dos elementos de fachada; organização destes elementos; e avaliação desta mesma composição. Cada uma destas etapas apresenta organizações menores com diferentes complexidades e ordem de execução, influenciando, sequencialmente, a próxima etapa.

O resultado de todo o processo pode ser caracterizado como um *performance model*, adaptado ao contexto do trabalho, seguindo exemplos de outras pesquisas como a de Sedrez e Meneghel (2013) e Oxman (2008). A composição final dos painéis é construída a partir dos resultados da radiação incidente na fachada, podendo ser reorganizada e ajustada pelo conseqüente comportamento lumínico do interior do modelo tridimensional e pela dimensão fractal que a composição de elementos de fachada gera. Assim, dentro do *performance model* de Oxman (2006), acrescentou-se mais uma função de ajustes antes da função geração, como representado pela figura 45.

Figura 45 – *Performance model* modificada.



Fonte: O autor

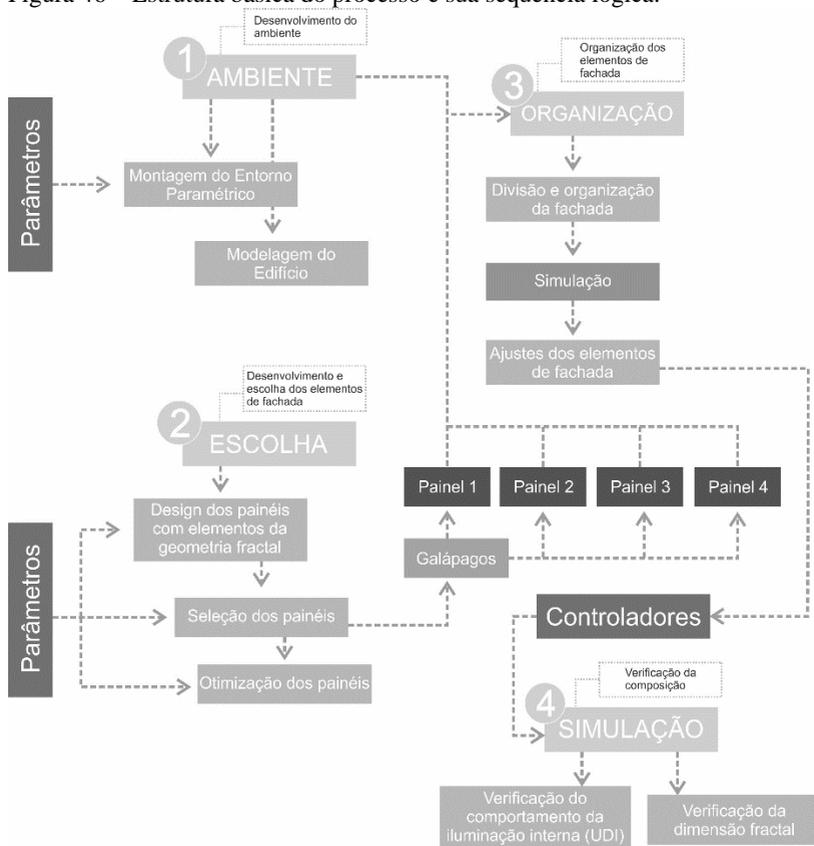
O processo foi construído seguindo a proposta de modelo paramétrico e algumas partes específicas utilizaram outros dois métodos: o IFS (*iterated functions system*) e um algoritmo genético. O IFS foi utilizado para a modelagem e construção das regras com características da geometria fractal, possibilitando a iteração dos princípios norteadores de cada painel. Em outra sequência– na otimização painéis principais –, optou-se pelo emprego de um algoritmo genético que permitiu alterar diferentes parâmetros tridimensionais dos elementos fachada.

A elaboração do modelo e de cada uma de suas partes foi executada no software de programação visual Grasshopper e auxiliada pelos plug-ins Hoopsnake e Diva. Para a visualização de todo o processo foi utilizado o programa de modelagem tridimensional Rhinoceros-3D 5. Dentro destes softwares foi empregado o MII (modelo interativo incremental) como método para a construção do processo, em que suas quatro etapas sequenciais de construção (concepção, elaboração, construção e transcrição) foram relacionadas com outros quatro estágios: modelagem do ambiente; modelagem, simulação, otimização dos painéis; organização da composição dos elementos de fachada; e verificação dos resultados do comportamento lumínico e da dimensão fractal. Este método permitiu que cada um dos estágios desenvolvidos na programação visual agisse de maneira independente, sem necessitar da finalização completa da etapa anterior. Estes modelos e ferramentas foram utilizados nas quatro partes principais do processo, sendo assim serão fragmentados no próximo subcapítulo e descritos detalhadamente em sequência.

### 3.1 ESTRUTURA DO PROCESSO

Para desenvolver o processo paramétrico capaz de criar, organizar e avaliar elementos de fachada com características fractais, quatro diferentes etapas foram desenvolvidas de forma cronológica, nomeadas como: ambiente; escolha; organização; e simulação. A figura 46 representa a estrutura geral do processo paramétrico e a figura 47 apresenta a programação visual que compõe o processo. Cada um destes quatro estágios possui diferentes elementos e componentes internos com parâmetros cabíveis de modificações.

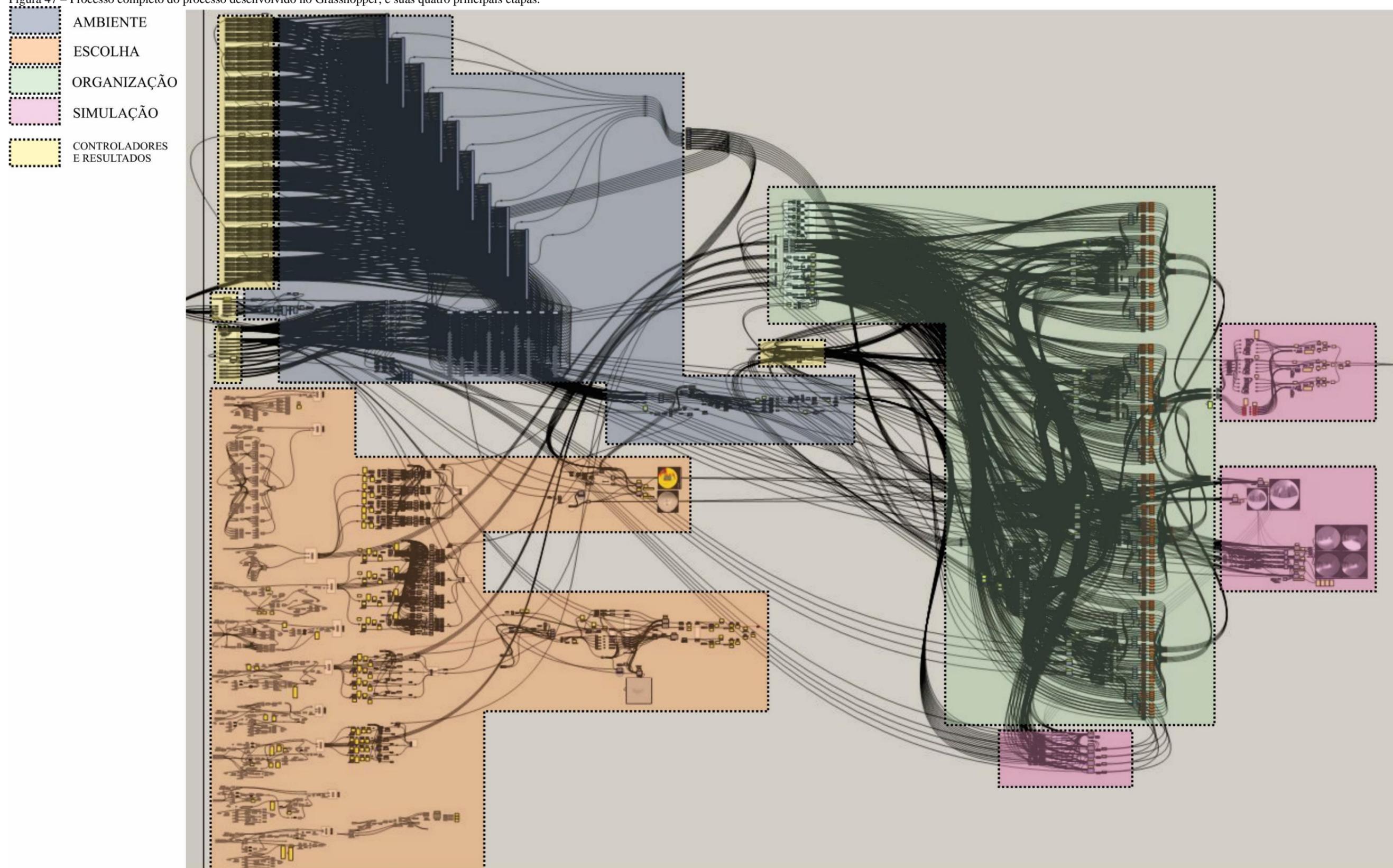
Figura 46 – Estrutura básica do processo e sua seqüência lógica.



Fonte: O autor.



Figura 47 – Processo completo do processo desenvolvido no Grasshopper, e suas quatro principais etapas.

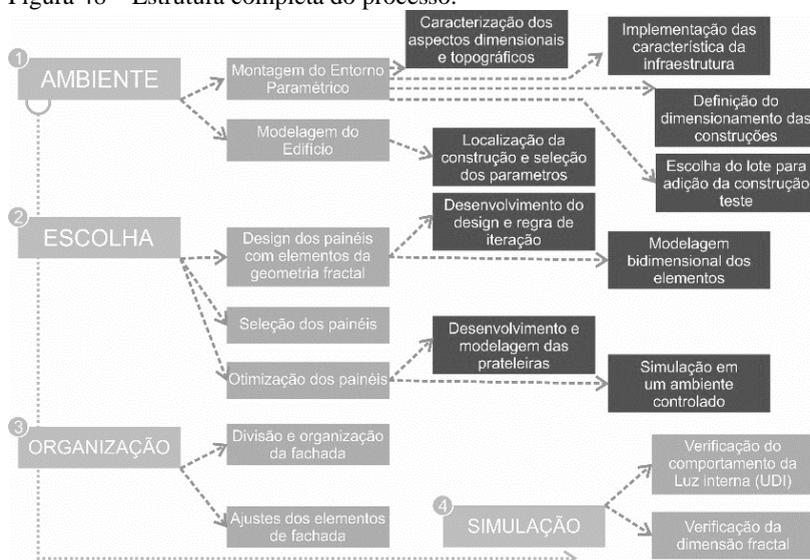


Fonte: O autor



A primeira fase (**Ambiente**) foi concebida a partir de duas etapas: a modelagem e organização de um entorno cabível de modificações e uma construção passível de se implementar as composições. O segundo estágio do processo paramétrico (**Escolha**) é dividido em três diferentes partes, inicialmente são desenvolvidos dez diferentes *designs* de painéis com características fractais, a partir de regras bidimensionais, na sequência, esses dez elementos de fachada são avaliados e escolhidos por seu comportamento lumínico. Após a avaliação, os quatro painéis com os resultados mais significativos são acrescidos de prateleiras de luz otimizadas por meio de um algoritmo genético. Na terceira etapa (**Organização**) os painéis desenvolvidos no segundo estágio são inseridos e organizados no modelo virtual do edifício. Na última fase do processo (**Simulação**) ocorrem as diferentes avaliações da organização dos painéis com base na dimensão fractal e comportamento da luz natural interna, verificando-se estes condicionantes por meio de duas composições geradas em dois entornos díspares. A sequência de todas as etapas podem ser observadas na figura 48.

Figura 48 – Estrutura completa do processo.



Fonte: O autor

Estas etapas são descritas e exemplificadas graficamente nos próximos capítulos, em que são demonstradas as menores sequências

organizacionais, a fim de proporcionar o entendimento da sequência lógica do processo paramétrico.

## 3.2 DESENVOLVIMENTO DE UM AMBIENTE PARAMETRICAMENTE MODIFICÁVEL

A primeira etapa do processo, denominada posteriormente de “**Ambiente**”, é dividida em duas partes, a montagem do ambiente (3.2.1) e a construção do edifício (3.2.2). As duas partes contêm uma série de passos que resultam em um ambiente tridimensional com nove quadras parametrizadas, com construções, infraestrutura e um espaço onde uma construção será inserida e no qual serão testados os elementos de fachada. O funcionamento destas duas partes do processo pode ser visualizado através da figura 148 no apêndice C.

A composição deste ambiente possui algumas limitações, como segue: só é possível manipular e modificar nove quadras (3x3), sem a alternativa de alterar essa quantidade; podem-se modificar suas dimensões gerais, mas de modo ortogonal, sem alterar os ângulos perpendiculares ou utilizar desenhos curvos; as dimensões das quadras são geradas a partir da divisão do terreno e do dimensionamento da infraestrutura, tornando impossível desenvolver quadras personalizadas com tamanhos específicos de modo isolado; e as construções, que podem ser inseridas e alteradas nos lotes, possuem um *design* rígido de caráter ortogonal, sem a possibilidade de desenvolver construções com diferentes formatos e escalonamentos.

### 3.2.1 Montagem do Entorno Urbano Parametrizado

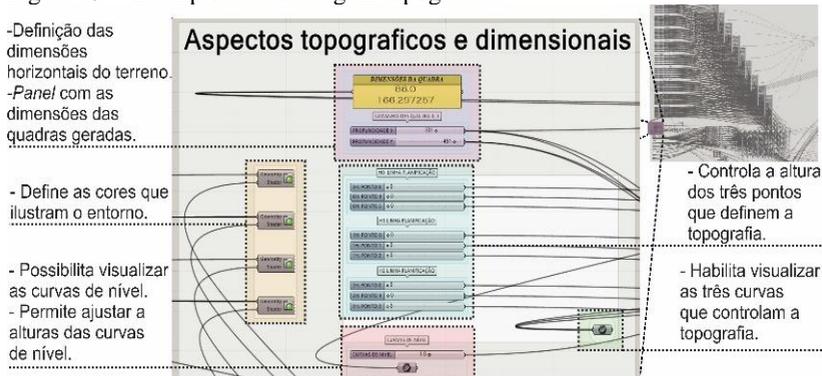
Na primeira etapa, um ambiente tridimensional foi desenvolvido para simular uma área de entorno cabível de modificações. Como resultado, será formado um conjunto com nove quadras ortogonais, onde é possível manipular a topografia, o número de lotes por quadra (individualmente), a infraestrutura (passeio, meio fio, vias), e as diferentes características das construções. O objetivo deste entorno é permitir a escolha de um dos lotes para implementar um edifício para os testes, permitindo que a incidência de luz natural que essa construção recebe seja modificada em consequência das alterações desse entorno imediato.

A montagem do entorno possui quatro passos, sendo: a caracterização dos aspectos dimensionais e topográficos; características da infraestrutura; dimensionamento das construções; e a escolha do lote

para os testes. Os parâmetros gerais designados para este estágio do processo podem ser observados pela tabela 6 (apêndice A).

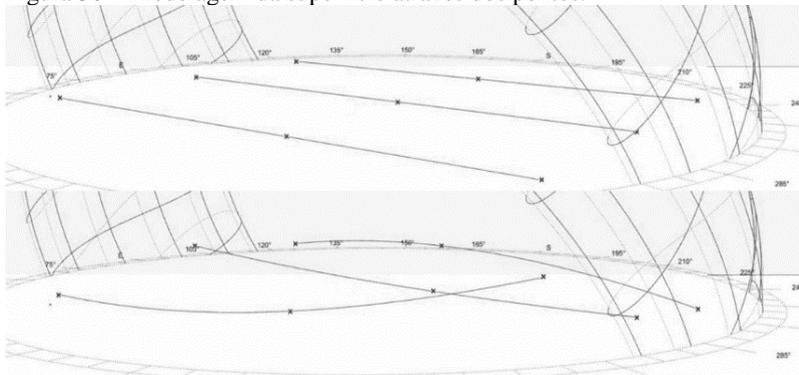
A modelagem desta parte do processo inicia-se com a definição das dimensões da área total do entorno (largura e comprimento), com 301 m de comprimento por 450 m de largura. Para o modelo aplicado na pesquisa optou-se pela construção de um local hipotético que se assemelhasse a ambientes reais, mas sem utilizar um recorte real. Após a escolha das dimensões horizontais do terreno pode-se modelá-lo verticalmente a partir de três curvas paralelas. Estas curvas possuem três pontos que podem ser ajustados variando sua altura, sendo que a união destas curvas por uma superfície molda o relevo do entorno. O resultado topográfico, gerado por essa superfície, pode ser observado através de curvas de nível que tem sua altura ajustada parametricamente em diferentes dimensões. Para auxiliar na interpretação do que está sendo modelado é possível definir uma cor para o terreno (meramente ilustrativa). A figura 49 demonstra o painel com os controladores para estes parâmetros (dimensionais e topográficos), as figuras 50 e 51 ilustram a sequência de passos correspondentes à modelagem da topografia, e as tabelas da figura 141 (apêndice A) apresentam os parâmetros utilizados na caracterização e topografia do entorno nas diferentes etapas de teste da pesquisa. (MARIANO; PEREIRA, 2017).

Figura 49 – Exemplo da modelagem topográfica.



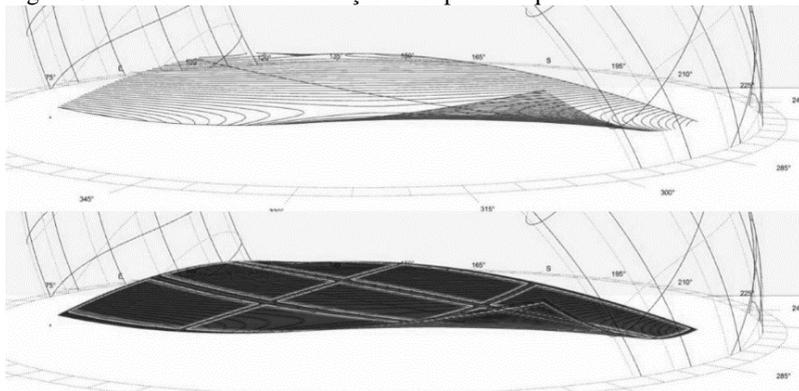
Fonte: O autor

Figura 50 – Modelagem da superfície através dos pontos.



Fonte: O autor

Figura 51 – Curvas de nível e criação da superfície que as une.

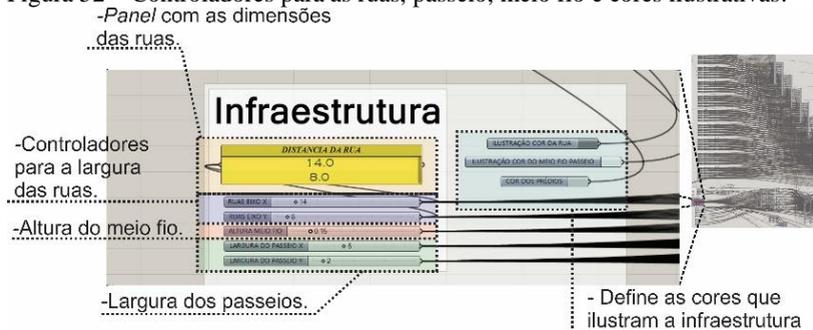


Fonte: O autor

Com o terreno ajustado (dimensões e topografia), o passo seguinte é inserir a infraestrutura (passeios, vias e meio fio). Os parâmetros que podem ser modificados são: as dimensões das vias; número de lotes por quadra, posicionamento do Norte; escolha de um lote específico para inserção de uma construção para testes; e definição de cores (meramente ilustrativas para a visualização). O primeiro ajuste referente à dimensão das ruas divide, conseqüentemente, a área do entorno em nove quadras (uma matriz de três por três), sendo que os caminhos e os passeios que cortam o entorno são passíveis de serem dimensionados, e existe a possibilidade de ajustar à altura do meio fio, (diferenciando o passeio da rua). Os parâmetros especificados na pesquisa para a esta etapa do

processo podem ser observados pela tabela 21 (apêndice A), e a figura 52 apresenta o painel com os controladores para a definição da infraestrutura das quadras. (MARIANO; PEREIRA, 2017).

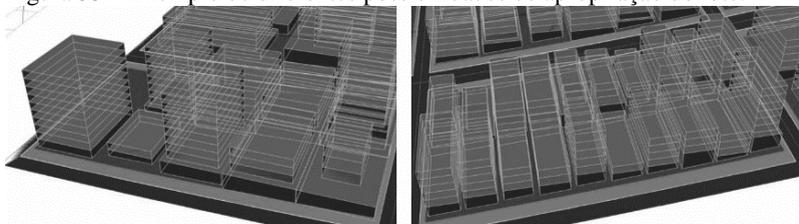
Figura 52 – Controladores para as ruas, passeio, meio fio e cores ilustrativas.



Fonte: O autor

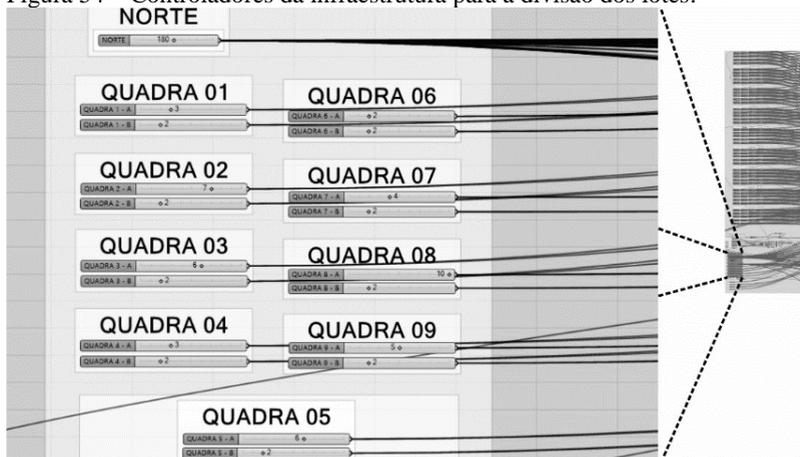
Na sequência é possível definir a divisão interna de cada quadra estabelecendo uma matriz. Nesta separação das quadras pode-se dividir o terreno em até vinte lotes, criando diferentes apropriações, que podem ou não receber construções, como demonstrado pela figura 53. As construções inseridas podem sofrer modificações como: altura do pavimento térreo; a relação da área ocupada pelo pavimento térreo no terreno, esta característica é definida através da escala em que é reduzida em comparação ao terreno (ex.: 1.00 corresponde a 100% da taxa de ocupação do terreno, 0.75 a 56,75%, 0.5 a 25%, estas relações são observadas nas tabelas presentes na figura 141 no apêndice A); a dimensão dos pavimentos tipo em relação à área do primeiro pavimento; a quantidade de repetições do andar tipo; e as alturas entre as lajes dos pavimento tipo. Os parâmetros desenvolvidos para modificar estas construções são controlados por painéis como ilustrado pela figura 54 e o controlador individual para cada construção pode ser observado pela figura 55. As tabelas presentes na figura 141 (apêndice A), apresentam os parâmetros ajustados para as construções em cada quadra nas duas etapas de teste do processo.

Figura 53 – Exemplo de diferentes possibilidades de apropriação do lote.



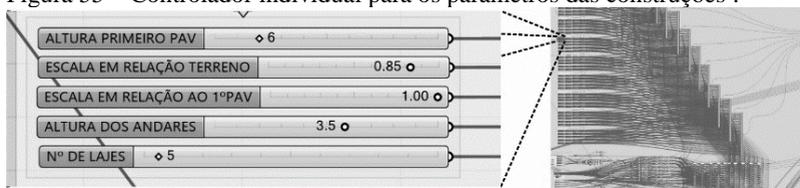
Fonte: O autor

Figura 54 – Controladores da infraestrutura para a divisão dos lotes.



Fonte: O autor

Figura 55 – Controlador individual para os parâmetros das construções .

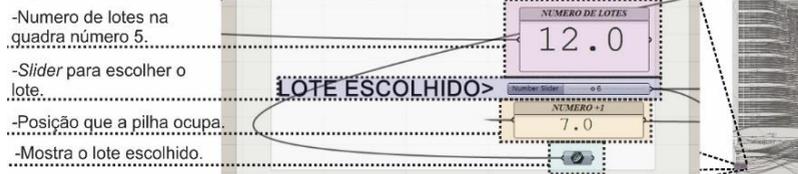


Fonte: O autor

O último passo da sequência, que compõe a estrutura do entorno, é a seleção do lote que irá receber a construção com os painéis fractais. É possível selecionar qualquer um dos lotes na quadra central (cinco) por meio de um controlador (figura 56). Com a escolha deste terreno, as funções anteriores atribuídas a ele devem ser desabilitadas (de forma

manual), deixando-o livre (sem construções), permitindo que ele seja utilizado para as próximas etapas do processo.

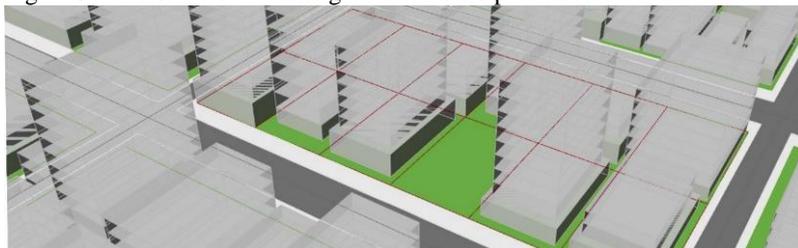
Figura 56 – Controlador para a seleção do lote.



Fonte: O autor

A organização destes quatro passos, para a montagem do entorno paramétrico, torna possível visualizar o entorno e o lote que será utilizado, gerando um resultado conforme a figura 57.

Figura 57 – Resultado da montagem do entorno paramétrico.



Fonte: O autor

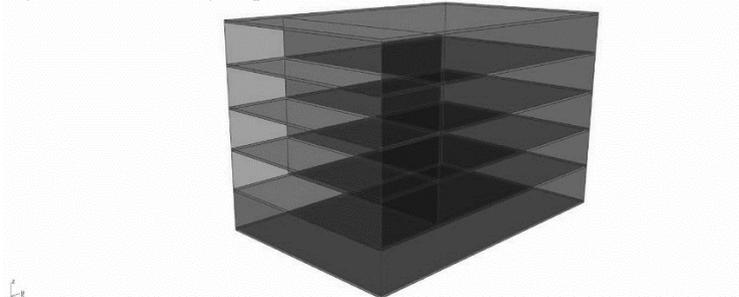
### 3.2.2 Modelagem do Edifício

Nesta segunda etapa do desenvolvimento do ambiente é modelada e inserida uma construção que receberá as composições dos painéis. Esse estágio é composto apenas pela escolha dos parâmetros que irão definir as características da construção que receberá os elementos de fachada. Como resultado cria-se um modelo de edifício parametricamente ajustável e suscetível à insolação consequente do seu ambiente de entorno.

Para a pesquisa utilizou-se o lote número sete na quadra central (número cinco), o sítio possui as dimensões de 37m x 23,05m e tem sua testada direcionada para o Norte. O modelo tridimensional foi moldado a partir de um ponto central sobre a área escolhida, sendo possível alterar diferentes parâmetros como: largura da testada; comprimento; altura dos pavimentos; largura das lajes; e número de andares. Em sua parte interna

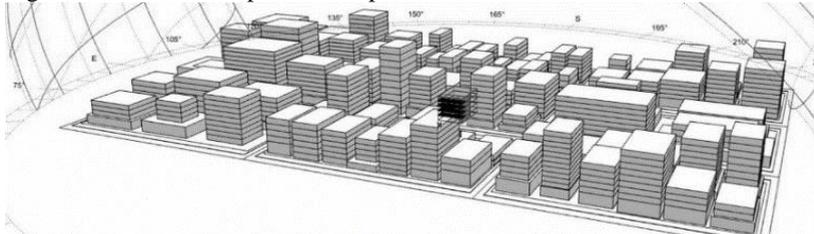
outros dois parâmetros foram fixados, com intuito de inserir salas individuais, se necessário, no interior da construção, de modo que o espaço dispusesse de alguns ambientes e de profundidade. A figura 58 mostra o resultado final desta etapa, as figuras 59 e 60 apresentam os dois entornos utilizados para a pesquisa com a inserção da construção. A figura 61 mostra o painel com os controladores designados para a modelagem da construção e a figura 141 (apêndice A) apresenta os parâmetros utilizados nesta etapa.

Figura 58 – Construção que receberá os elementos de fachada.



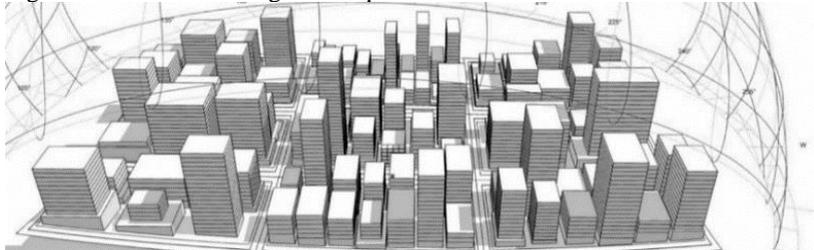
Fonte: O autor

Figura 59 – Entorno na primeira etapa de testes.



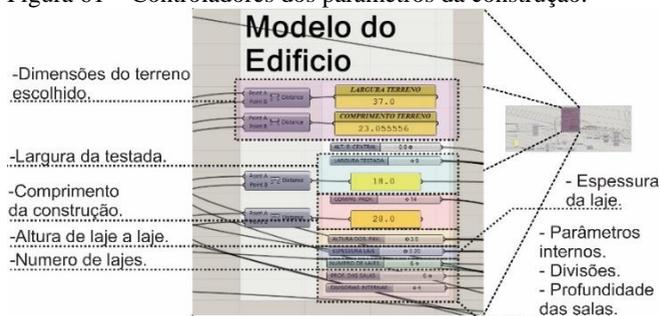
Fonte: O autor

Figura 60 – Entorno na segunda etapa de testes.



Fonte: O autor

Figura 61 – Controladores dos parâmetros da construção.



Fonte: O autor

### 3.3 DESENVOLVIMENTO E ESCOLHA DOS ELEMENTOS DE FACHADA

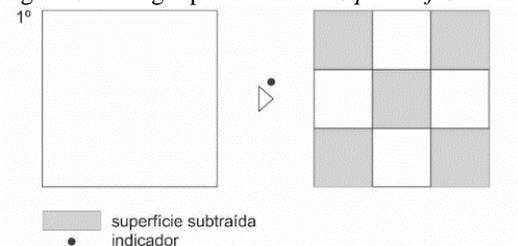
Esta seção comenta as etapas para o desenvolvimento dos elementos de fachada, com características fractais, que irão compor a fachada principal do edifício modelado. Esta etapa do processo, denominada posteriormente como “Escolha”, é dividida em três partes: o design dos painéis com elementos da geometria fractal; a análise e seleção destes painéis e suas respectivas iterações; e a otimização dos principais elementos. O resultado dessa parte do processo gera quatro tipos de elementos de fachada (cada um com cinco elementos de composição), que podem ser utilizados na ornamentação e no controle da luz natural da construção desenvolvida na etapa anterior. O funcionamento destas três partes do processo pode ser visualizado através da imagem 149 no apêndice C.

#### 3.3.1 *Design* dos Elementos com as Características da Geometria Fractal

A primeira etapa da confecção e modelagem dos painéis com características fractais é dividida em duas partes: o desenvolvimento do *design* e regra de iteração para os elementos de fachada; e a modelagem bidimensional destes elementos dentro do processo. Para o desenvolvimento de cada um dos painéis foram utilizadas dez regras de fractais Lineares, como: *Square of Gasket*; *Jerusalem Cross*; Tapete de Sierpinski; Conjunto de Cantor; Triângulo de Sierpinski; Curva de Minkowski; Curva de Peano; Curva de Dragão; *Fractal Tree*; e Ilha de Koch (figuras 62 a 71).

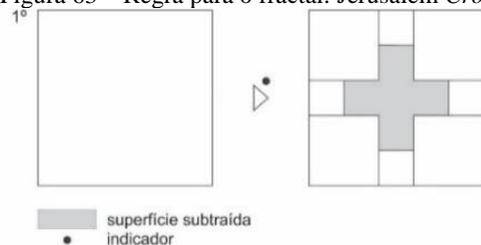
Na primeira etapa deste processo, os dez padrões fractais foram analisados a fim de identificar suas características formais, para representar suas regras de forma adequada ao processo. Os padrões fractais foram desenvolvidos dentro do processo paramétrico buscando a compreensão de como modelar suas regras, para então identificar modos de como alterá-las, a fim de se desenvolver um design semelhante para os elementos de fachada, permitindo gerar mudanças em sua geometria final sem descaracterizar o tipo de fractal.

Figura 62 – Regra para o fractal: *Square of Gasket*.



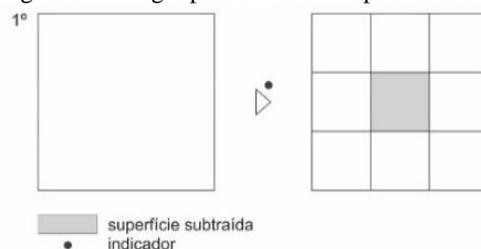
Fonte: O autor

Figura 63 – Regra para o fractal: *Jerusalem Cross*.



Fonte: O autor

Figura 64 – Regra para o fractal: Tapete de Sierpinski.



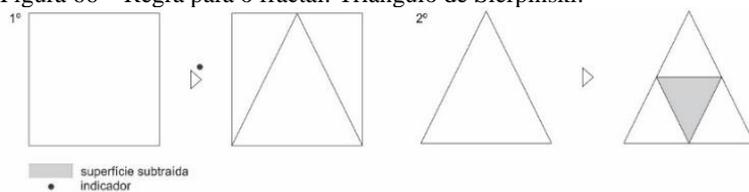
Fonte: O autor

Figura 65 – Regra para o fractal: Conjunto de cantor.



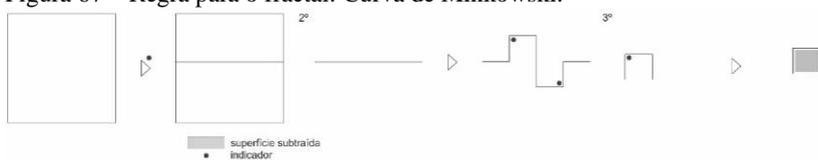
Fonte: O autor

Figura 66 – Regra para o fractal: Triângulo de Sierpinski.



Fonte: O autor

Figura 67 – Regra para o fractal: Curva de Minkowski.



Fonte: O autor

Figura 68 – Regra para o fractal: Curva de Peano.



Fonte: O autor

Figura 69 – Regra para o fractal: Curva de Dragão.



Fonte: O autor

Figura 70 – Regra para o fractal: *Fractal Tree*.

Fonte: O autor

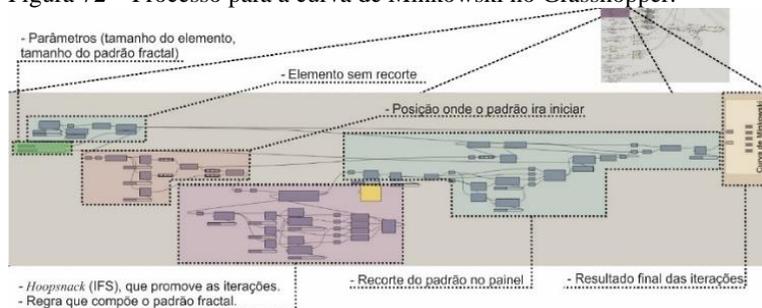
Figura 71 – Regra para o fractal: Ilha de Koch.



Fonte: O autor

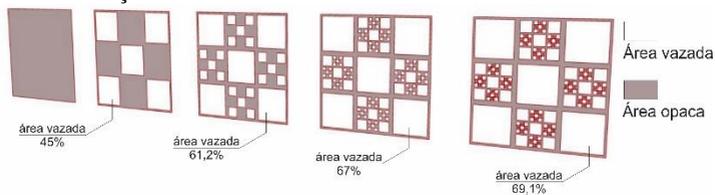
Na segunda etapa, as regras geradoras dos fractais foram inseridas em painéis padrão de 3m x 3m, e iteradas quatro vezes, para gerar cinco painéis distintos, cada um com um diferente nível de iteração. Assim, foram gerados cinco painéis diferentes para cada tipo de fractal, totalizando 50 diferentes painéis. Cada grupo destes painéis possui o seu primeiro elemento de fachada totalmente opaco, sem nenhuma subtração, e à medida que sofre as iterações, cada regra subtrai uma determinada área. O plug-in *Hoopsnake* foi utilizado para modelagem dos padrões fractais, o que permitiu iterar a regra de cada padrão fractal repetidas vezes, por meio de um IFS. Como exemplo da construção destes padrões temos a figura 72, que apresenta o desenvolvimento do padrão da curva de Minkowski, as demais sequências da programação visual estão presentes na figura 142 (Apêndice A). Os resultados da modelagem estão representados nas figuras 73 a 82, com os painéis modelados até a sua quarta iteração.

Figura 72 – Processo para a curva de Minkowski no Grasshopper.



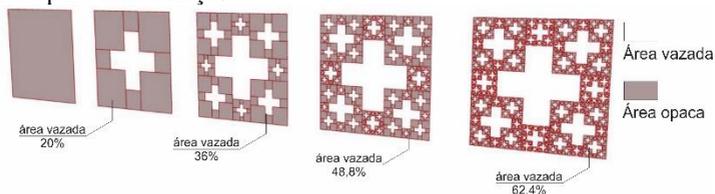
Fonte: O autor

Figura 73 – Painéis com o *Square of Gasket*, com porcentagem da área vazada para cada iteração.



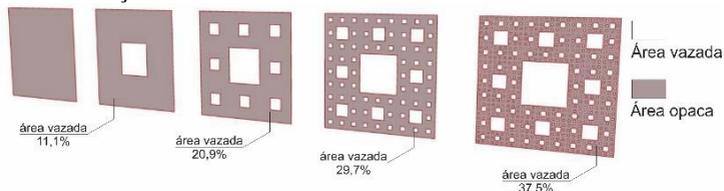
Fonte: O autor

Figura 74 – Painéis com o *Jerusalem Cross Gasket*, com porcentagem da área vazada para cada iteração.



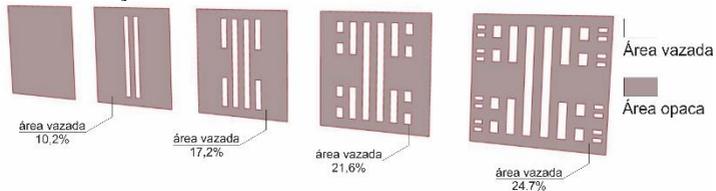
Fonte: O autor

Figura 75 – Painéis com o Tapete de Sierpinski, com porcentagem da área vazada para cada iteração.



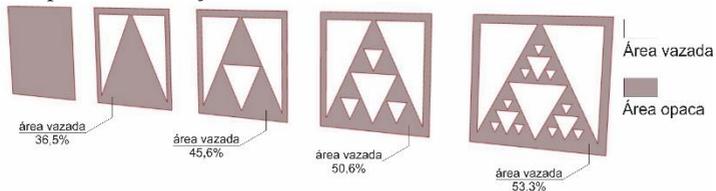
Fonte: O autor

Figura 76 – Painéis com o Conjunto de cantor, com porcentagem da área vazada para cada iteração.



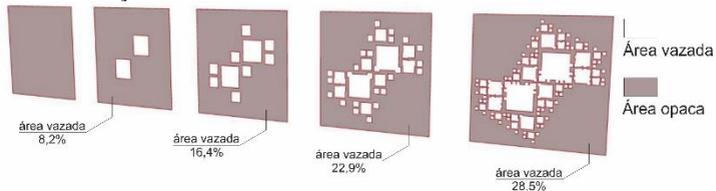
Fonte: O autor

Figura 77 – Painéis com o Triângulo de Sierpinski, com porcentagem da área vazada para cada iteração.



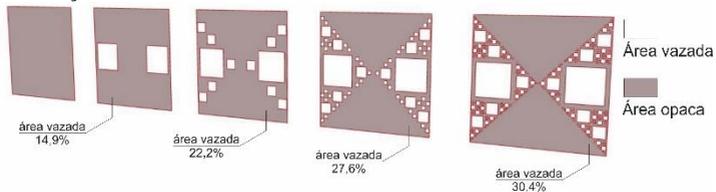
Fonte: O autor

Figura 78 – Painéis com o Curva de Minkowski, com porcentagem da área vazada para cada iteração.



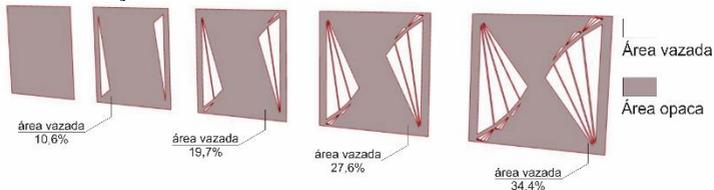
Fonte: O autor

Figura 79 – Painéis com o Curva de Peano, com porcentagem da área vazada para cada iteração.



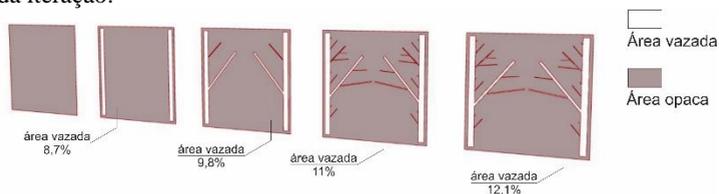
Fonte: O autor

Figura 80 – Painéis com o Curva de Dragão, com porcentagem da área vazada para cada iteração.



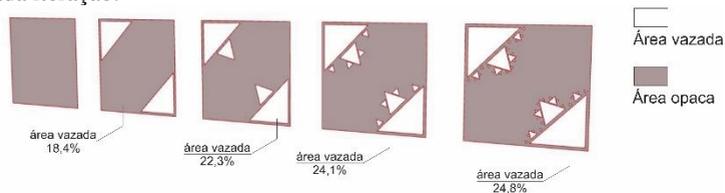
Fonte: O autor

Figura 81 – Painéis com o *Fractal Tree*, com porcentagem da área vazada para cada iteração.



Fonte: O autor

Figura 82 – Painéis com o Ilha de Koch, com porcentagem da área vazada para cada iteração.

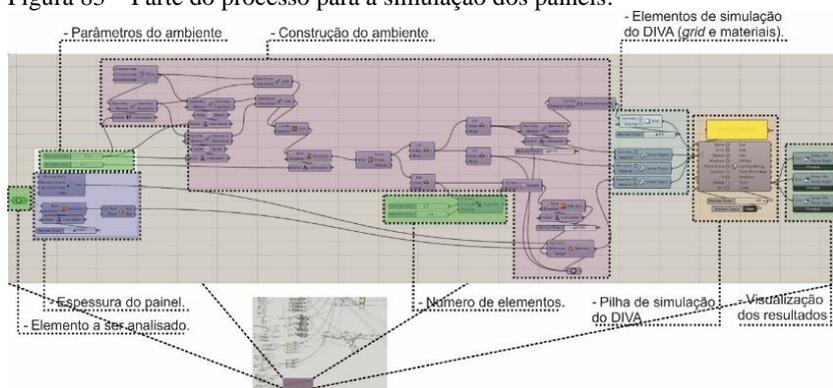


Fonte: O autor

### 3.3.2 Seleção dos Painéis

Os painéis modelados com *designs* da geometria fractal foram submetidos a diferentes testes, cujo objetivo era identificar os resultados do comportamento lumínico de cada grupo de painéis e verificar as diferentes iterações de cada padrão. Esta avaliação analisa a iteração e seu respectivo comportamento lumínico, buscando por painéis que a cada iteração permitem um determinado padrão de acréscimo da quantidade de luz natural dentro do ambiente interno. Esta etapa do processo é identificada por meio da figura 83.

Figura 83 – Parte do processo para a simulação dos painéis.

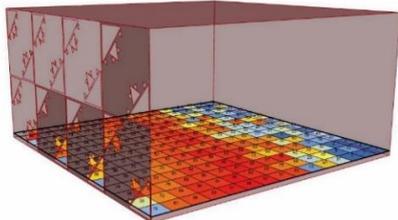


Fonte: O autor

Para analisar os resultados lumínicos de cada painel, um ambiente virtual foi modelado com as seguintes dimensões: 6m de profundidade, por 6m de largura e 3m de altura. Este ambiente foi considerado térreo e seu posicionamento pensado para que duas de suas faces estivessem em eixos cardeais norte e sul.

O modelo foi ajustado para que cada uma das fachadas pudesse ser composta por um total de 8 painéis, cada um deles como a mesma dimensão (1,5 x 1,5m). Todos os elementos empregados nas composições tiveram seus parâmetros ajustados para que ficassem iguais, com espessura de 3mm. Tais parâmetros, por sua vez, não receberam quaisquer tipos de elementos adicionais, como prateleiras de luz, estrutura e perfurações. A figura 84 apresenta uma amostra do ambiente virtual.

Figura 84 – Ambiente de simulação dos painéis.



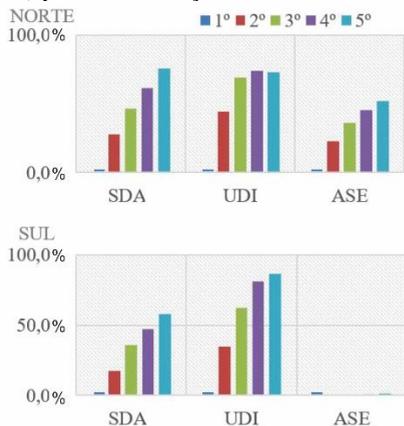
Fonte: O autor

Os índices, utilizados para verificar o comportamento lumínico do ambiente, seguiram os modelos da IES (*Illumination Engineering society*), que caracterizam a quantidade de luz em um ambiente. Reinhart,

Mardaljevic e Rogers (2006) sugerem que o uso de simulações dinâmicas, (*dynamic daylight simulation*), são uma alternativa viável para facilitar a interpretação de resultados lumínicos, pois, os resultados numéricos das simulações dinâmicas possuem relevância na interpretação da luz natural. As simulações dinâmicas foram feitas por meio do DIVA, como *plug-in* para Grasshopper, e três índices foram mensurados: o *Useful Daylight Illuminance*, (UDI), o *sDA (spacial daylight autonomy)* e o *ASE (anual sunlight exposure)*. Para tais simulações foi empregado o arquivo climático BRA\_FLORIANOPOLIS838990\_SWERA, referente à cidade de Florianópolis, SC, Brasil. Cada composição foi avaliada duas vezes em posicionamentos diferentes. Na primeira, foram inseridos na fachada elementos voltados para a face Norte do modelo, e na segunda composição, foram ajustados elementos para a face Sul. Para as simulações, não há um modelo tridimensional de entorno que considere somente a iluminação natural, sem a interferência de áreas sombreadas ou outras barreiras. No total foram rodadas 100 simulações, dez para cada padrão de geometria fractal. Os parâmetros avançados de configuração de radiação, utilizados no componente DIVA para a simulação, podem ser observados pela tabela 13 no apêndice A.

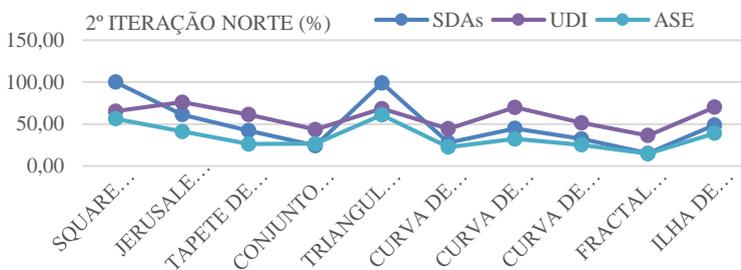
Os resultados métricos de cada painel foram repassados para uma planilha e divididos em três grupos. O primeiro por tipo de fractal, demonstrando os diferentes resultados métricos, para cada iteração, quando direcionados para a fachada Norte ou para a fachada Sul (figura 85). O segundo agrupa todos os tipos de fractais e avalia os seus resultados conforme a iteração e orientação solar, Norte ou Sul (figuras 86 e a 87). O último agrupa diferentes fractais e avalia somente uma métrica nas quatro iterações simuladas (figura 88).

Figura 85 – Resultados do SDAs, UDI e ASE da Curva de Minkowski (Norte e Sul) para cada iteração.



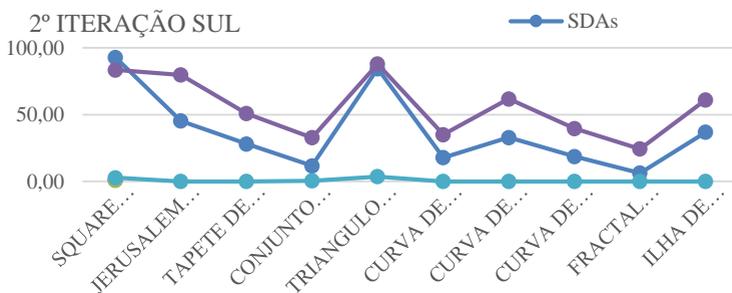
Fonte: O autor

Figura 86 – Resultado os tipos de fractais conforme a iteração (Norte).



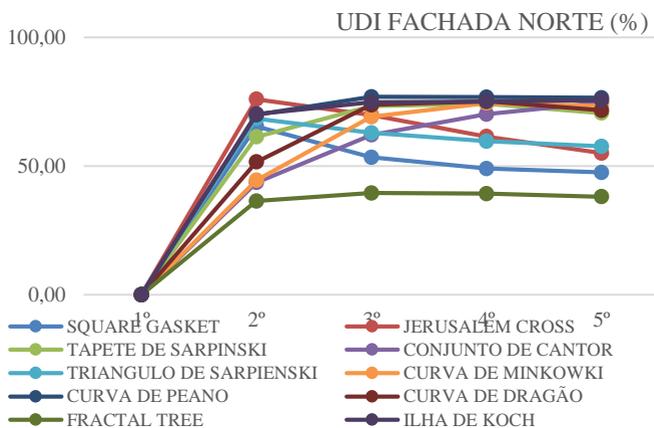
Fonte: O autor

Figura 87 – Resultado os tipos de fractais conforme a iteração (Sul).



Fonte: O autor

Figura 88 – Resultados gerais para o UDI, (Norte).



Fonte: O autor

Os resultados demonstraram as diferentes potencialidades e deficiências dos elementos de fachada com características fractais. Parte dos elementos apresenta perspectivas positivas a respeito da seleção da luz natural, da característica das iterações infinitas (permitindo que a cada iteração uma quantidade diferente de luz natural penetre no ambiente). Contudo, três elementos demonstraram deficiências desta característica, pois a cada iteração, os resultados apresentavam pouca mudança nos níveis de iluminação que adentravam no ambiente, e muitas vezes, acusavam até um excesso de luz representado pelo UDI e ASE.

Alguns resultados indicaram constância na quantidade de luz dentro do ambiente, e outros, indicaram excesso de luz, que pode ser interpretado pela diminuição dos índices de UDI. Tal diminuição foi ocasionada, pois a partir da segunda iteração o painel já apresentava uma parte considerável de sua área total subtraída por suas regras de composição. Os painéis que apresentaram essa característica foram: *Square Gasket*, *Jerusalem Cross*, e *Triângulo de Sierpinski*. Outro elemento que apresentou um resultado de pouca expressão foi o *Fractal Tree*, uma vez que, ao contrário dos painéis mencionados anteriormente, a pouca diferença da área subtraída nas iterações teve o efeito contrário, ocasionando uma adição insignificante de luz.

Os painéis que apresentaram melhor desempenho luminoso através da capacidade de seleção da luz natural, em proporções diferenciadas para cada iteração, foram os elementos desenvolvidos com as regras fractais, *Tapete de Sierpinski* (figura 89), *Curva de Minkowski* (figura 90), *Curva*

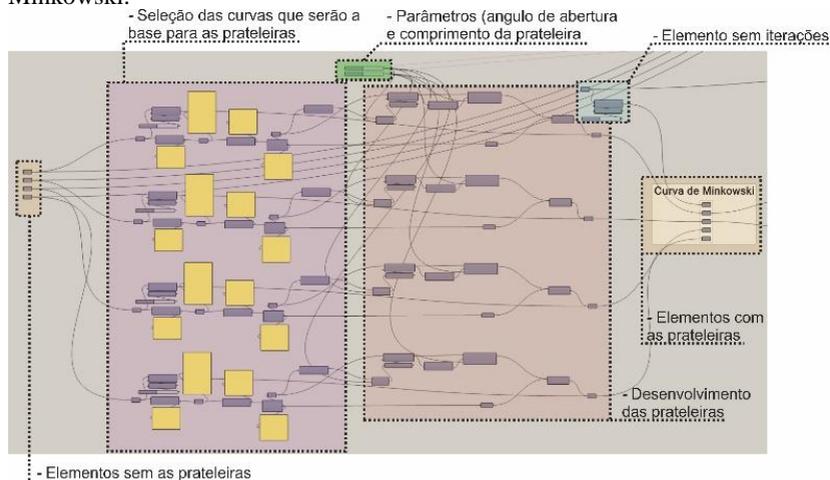
de Dragão (figura 91) e Conjunto de Cantor (figura 92). Estes elementos demonstraram que possuem diferentes filtragens da luz para cada iteração. Os resultados das simulações podem ser observados pelas figuras 143 a 144 (Apêndice A).

### **3.3.3 Otimização dos Painéis**

Nesta parte do processo, os quatro painéis identificados na etapa anterior receberão elementos de controle de iluminação, e terão seus dimensionamentos ajustados para distribuir de modo uniforme a luz natural no ambiente interno. Esta etapa é dividida em outras duas: o desenvolvimento e modelagem das espessuras dos componentes; e sua simulação em um ambiente controlado, por um processo generativo, por meio do componente Galápagos. O resultado dessa etapa será potencializado pelo uso dos quatro elementos fractais para verificar o comportamento da luz natural interna.

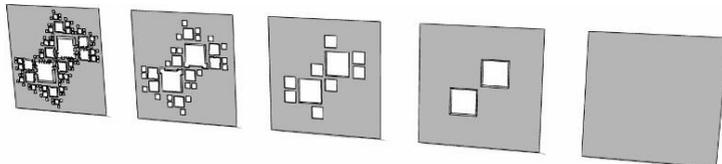
A primeira parte desta etapa do processo é a modelagem e angulação das diferentes espessuras que irão complementar os painéis. Cada painel foi complementado por uma composição singular do processo, pois as diferentes características de cada um dos fractais necessitam de alterações específicas para que seus parâmetros sejam modificados. As alterações compreendem o ângulo de abertura das prateleiras e o seu respectivo comprimento. As figuras 89 e 90 demonstram esta etapa do processo e seus respectivos resultados. Os demais elementos estão representados pela figura 142 no apêndice A.

Figura 89 – Processo que cria as prateleiras para o padrão fractal Curva de Minkowski.



Fonte: O autor.

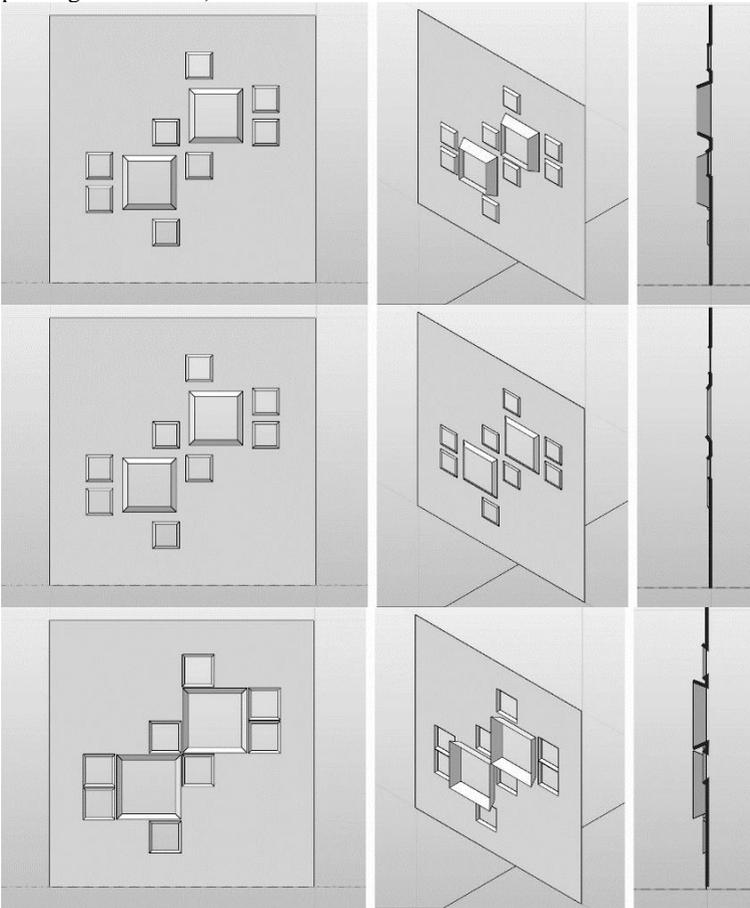
Figura 90 – Processo que cria as prateleiras para o padrão fractal Curva de Minkowski.



Fonte: O autor.

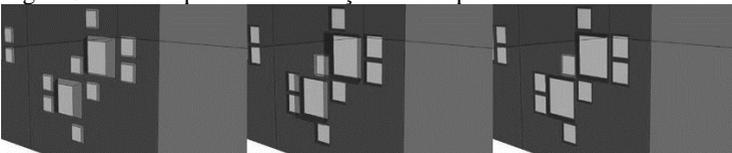
Para que as espessuras não descaracterizem o conceito da geometria, o seu comprimento segue a proporção das áreas individuais de cada parte subtraída dos painéis, possibilitando assim, que áreas menores não desconfigurem a composição por possuírem uma espessura demasiadamente longa. A angulação da prateleira de luz (seu ângulo de abertura) foi delimitada para que elas não se encontrem umas com as outras, e também para evitar que fechem (figuras 91 e a 92).

Figura 91 – Diferentes vistas das possíveis modificações da espessura do elemento de fachada (ângulo de abertura fechado ou aberto e espessura prolongada ou curta).



Fonte: O autor.

Figura 92 – Exemplo de modificações nas espessuras dos elementos.



Fonte: O autor.

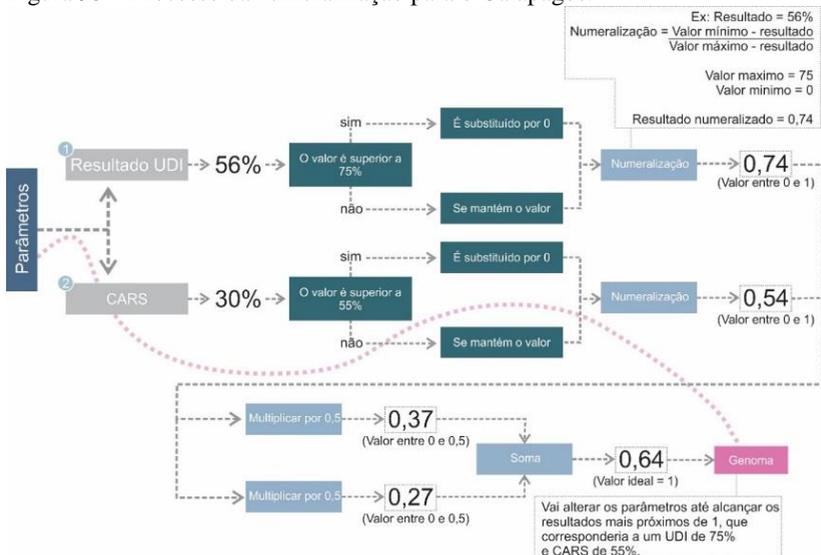
Quando estiverem prontas, as prateleiras serão otimizadas por meio do componente Galápagos. As otimizações são referentes a distribuição da luz interna no ambiente (UDI) e a quantidade de radiação que transpassa cada um dos elementos de proteção solar (CARS).

Para utilizar o componente Galápagos foi necessária a modelagem de um ambiente de simulação semelhante ao do passo anterior, com as dimensões de seis metros por seis metros, e três metros de altura (6m x 6m x 3m). Na fachada Norte não foi adicionado fechamento, mas sim os elementos de proteção. Esta fachada foi dividida em uma malha de três por seis, permitindo a inserção de 18 elementos iguais de um metro por um metro. As simulações, mais vez, foram realizadas por meio do DIVA e o arquivo climático utilizado foi BRA\_FLORIANOPOLIS838990\_SWERA, este arquivo é referente à cidade de Florianópolis, SC, Brasil. Os parâmetros empregados no DIVA podem ser visualizados pela tabela 13 no apêndice A.

Para equalizar os valores do UDI e CARS, a fim de otimizar os resultados, as recorrentes respostas obtidas a partir das simulações foram numeralizadas. Neste processo, o resultado das simulações é transformado em um número racional entre 0 e 1,0. Como o Galápagos pode avaliar somente uma resposta quantitativa, os dois valores resultantes tiveram de se equivaler, atribuindo uma porcentagem de 50% para cada um. Assim, o Galápagos conseguiria buscar o valor máximo de 1,0 e as simulações de UDI alcançariam 0.5 e as de CARS 0.5.

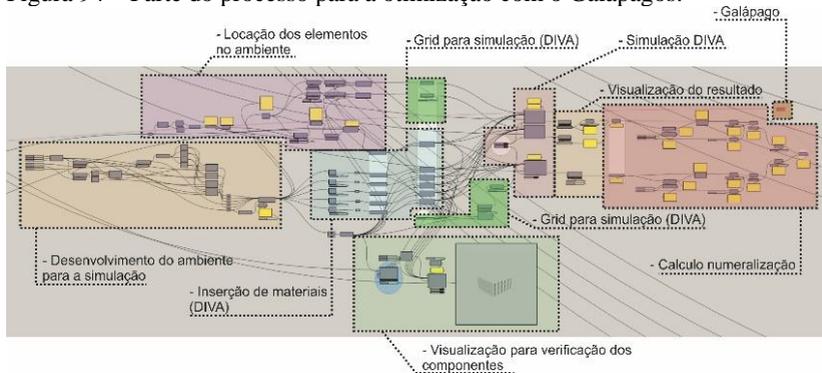
Para cada resultado não ultrapassar o valor desejável, UDI 75% e CARS de 55%, balanceando equivocadamente os valores, quando o resultado exceder os valores ideais, ele é substituído por 0, diminuindo o seu valor final. Para cada iteração de cada elemento o componente Galápagos foi utilizado durante um período de até 48h, buscando gerar no mínimo 50 simulações. A figura 93 mostra a sequência lógica do seu desenvolvimento e a figura 94 demonstra esta etapa do processo. O resultado desta parte do processo pode ser observado pela tabela 6 e as simulações e escolha do painel com melhores resultados para o Tapete de Sierpinski, Conjunto de Cantor, Curva de Minkowski e Curva de Dragão pode ser visualizada pela figura 146 (Apêndice B). A figura 145 (Apêndice A) apresenta os recortes dos resultados do componente Galápagos.

Figura 93 – Processo da numeração para o Galápagos.



Fonte: O autor

Figura 94 – Parte do processo para a otimização com o Galápagos.



Fonte: O autor

Tabela 6 – Resultado da otimização dos painéis.

TAPETE DE SIERPINSKI	ESPESSURAS		ILUMINAÇÃO		NUMERALIZAÇÃO		
	ÂNG (°)	ESC.	Cars	UDI	Cars	UDI	FINAL
INT_01_N	333	0.31	8,57	58,1	0,155818	0,775733	0.46588
INT_02_N	362	0.31	12,63	74,4	0,229636	0,992933	0.61139
INT_03_N	331	0.30	21,07	74,7	0,230376	0,996133	0.61325
INT_04_N	360	0.34	23,87	74,9	0,230993	0,9988	0.61489
<b>CONJUNTO DE CANTOR</b>							
INT_01_N	378	0.02	7,37	57,15	0,134	0,762	0.448137
INT_02_N	368	0.003	12,30	74,86	0,223636364	0,998133	0.610965
INT_03_N	336	0.018	12,62	74,80	0,229454545	0,997333	0.613463
INT_04_N	341	0.048	10,74	74,90	0,195272727	0,998666	0.595973
<b>CURVA DE MINKOWSKI</b>							
INT_01_N	0.1	1.11	6,52	45,32	0,118545455	0,604266	0.322799
INT_02_N	0.19	1.04	12,24	74,96	0,222545455	0,999466	0.611487
INT_03_N	0.10	0.92	16,02	74,59	0,291181818	0,994533	0.642912
INT_04_N	0.11	0.81	14,08	74,50	0,256	0,993333	0.628657
<b>CURVA DE DRAGÃO</b>							
INT_01_N	0.99	0.31	4,64	40,25	0,084363636	0,536666667	0.3109
INT_02_N	1.00	0.32	10,00	70,38	0,181818182	0,9384	0.559715
INT_03_N	0.89	0.40	11,99	74,45	0,218	0,992666667	0.605839
INT_04_N	0.77	0.43	11,98	74,90	0,217818182	0,998666667	0.606606

Fonte: O autor.

Por meio da otimização feita com o Galápagos, pode-se obter os parâmetros pertinentes para cada iteração dos painéis com características fractais, resultando assim, no painel ideal que será utilizado na composição da fachada.

### 3.4 ORGANIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DE FACHADA

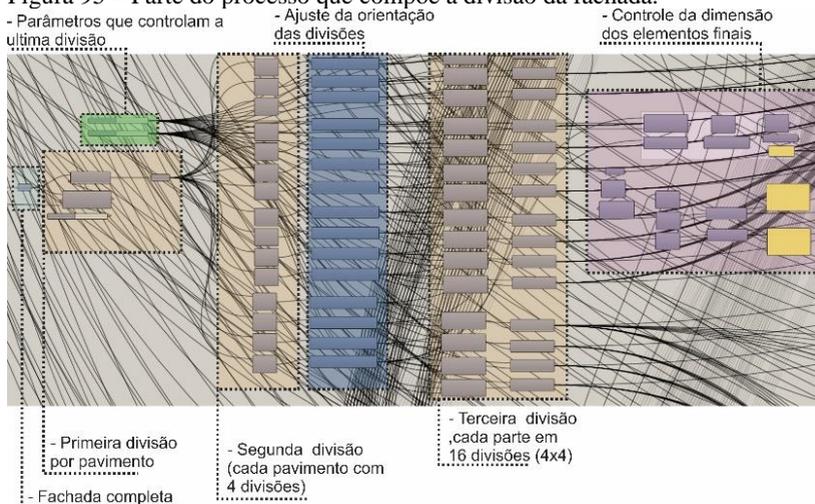
Na terceira parte do processo, acontece a união das duas etapas anteriores (Ambiente e Escolha). Esta etapa é dividida em duas fases: a organização e divisão da fachada e a inserção e controle destes elementos. As partes do processo que compreendem estas etapas podem ser localizadas na figura 150 no apêndice C.

#### 3.4.1 Divisão e Organização da Fachada

Esta etapa do processo inicia com a divisão e organização dos espaços que serão preenchidos pelos elementos de fachada. Primeiramente o local a ser completado pelos painéis é dividido, individualizando a fachada de cada andar, em seguida a fachada dos

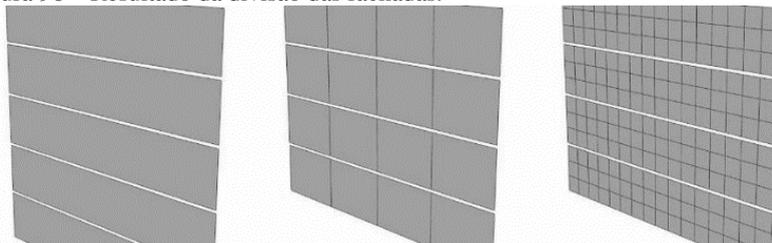
pavimentos é dividida em quatro partes iguais, esta subdivisão dos painéis serve para que o espaço interno de cada andar seja avaliado individualmente (caso os andares tenham divisões internas). Na sequência, cada um destes quatro espaços é dividido novamente por uma matriz, permitindo o ajuste da quantidade e tamanho dos elementos de fachada. Para a pesquisa optou-se por subdividir cada parte em dezesseis fatias menores (4x4), totalizando 64 elementos de fachada por andar, com 1,13m de largura por 1,125m de altura. A figura 95 ilustra a organização nesta parte do processo, e a figura 96 o resultado desta divisão

Figura 95 – Parte do processo que compõe a divisão da fachada.



Fonte: O autor

Figura 96 – Resultado da divisão das fachadas.



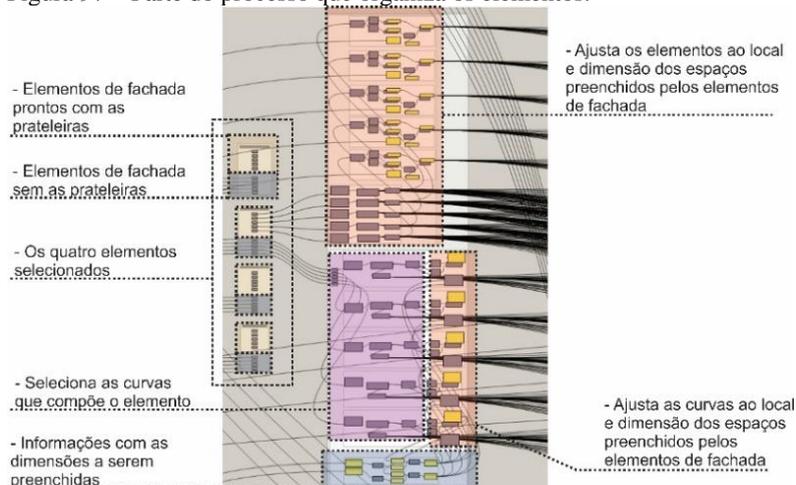
Fonte: O autor

Na sequência, estes espaços são ajustados para receber uma das cinco iterações de um tipo de fractal desenvolvido nas etapas anteriores.

Os fractais são atualizados para ocupar uma das posições da matriz de cada andar, ajustando automaticamente seu tamanho (largura, comprimento e profundidade) à divisão feita antes, e se posicionando, inicialmente, a partir da leitura da radiação na fachada.

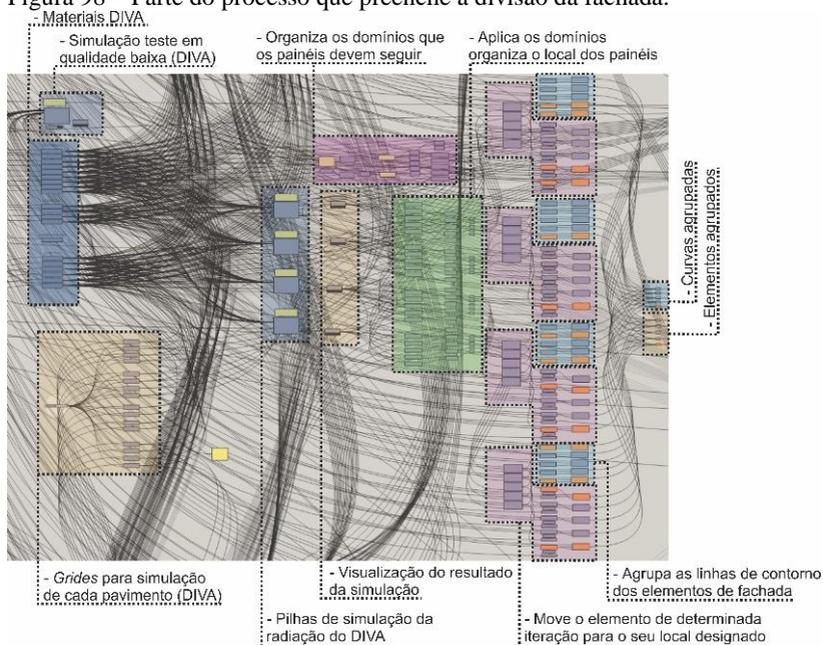
Para a análise de radiação que incide sobre a fachada, novamente utilizou-se o plug-in DIVA, avaliando, neste caso, a radiação média incidente em cada andar. A cada simulação foi realizada uma outra simulação separada, para que os painéis se organizem diferentemente em cada pavimento, possibilitando o controle da composição. Os painéis são organizados dividindo as suas diferentes iterações de acordo com a intensidade da radiação que incide sobre a fachada, posicionando os painéis com mais iterações nos quadrantes onde os índices de radiação são menores, e os painéis com menos iterações nas divisões com maior incidência de radiação. Consequentemente, os elementos de fachada com a maior área de subtração serão posicionados nos locais identificados com menores índices de radiação, e os com as menores áreas subtraídas, posicionados nos locais com maiores índices de radiação. A figura 97 apresenta o desenvolvimento desta etapa no Grasshopper (escolha do fractal a ser utilizado) para preencher a fachada, a figura 98 mostra a sequência da organização dos elementos no Grasshopper, e a a figura 99 demonstra como a sequência funciona.

Figura 97 – Parte do processo que organiza os elementos.



Fonte: O autor

Figura 98 – Parte do processo que preenche a divisão da fachada.



Fonte: O autor

Figura 99 – Resultado da sequência de preenchimento.



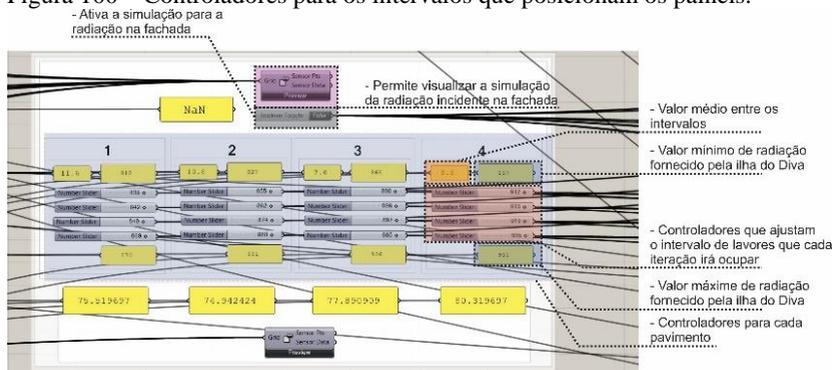
Fonte: O autor

Nesta etapa, após a organização dos painéis, as principais curvas que os compõem são mapeadas e extraídas, esta seleção é feita para contemplar, em etapas futuras do processo, a contagem da dimensão fractal. Este mapeamento das curvas que compõem os elementos de fachada é automático e atualizado a cada tipo de fractal utilizado ou à composição desenvolvida.

### 3.4.2 Ajuste dos Elementos de Fachada

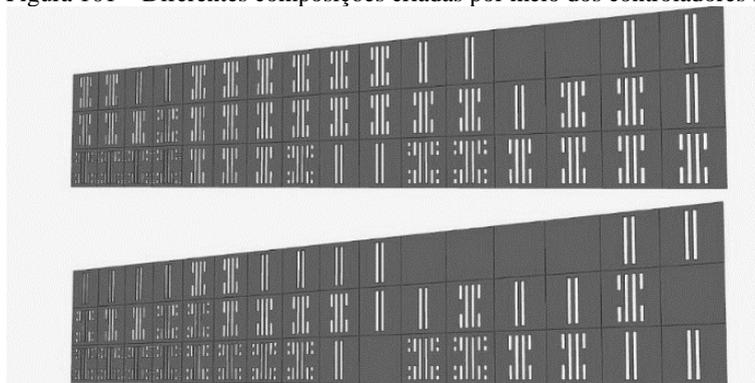
Com os elementos inseridos em uma primeira composição, é possível controlar o posicionamento das diferentes iterações por meio de uma janela de valores. Estas janelas, por sua vez, possibilitam ajustar os intervalos que cada tipo de painel irá ocupar. Os quantitativos máximos e mínimos são apresentados em diferentes painéis, viabilizando a escolha dos valores que irão compor o intervalo que cada iteração de um determinado tipo de elemento de fachada vai ocupar. Os painéis que demonstram os resultados da pilha do DIVA, e os controladores que ajustam às diferentes iterações, podem ser observados pela figura 100 e o resultado do seu uso pode ser observado pelas figuras 101 e 102.

Figura 100 – Controladores para os intervalos que posicionam os painéis.



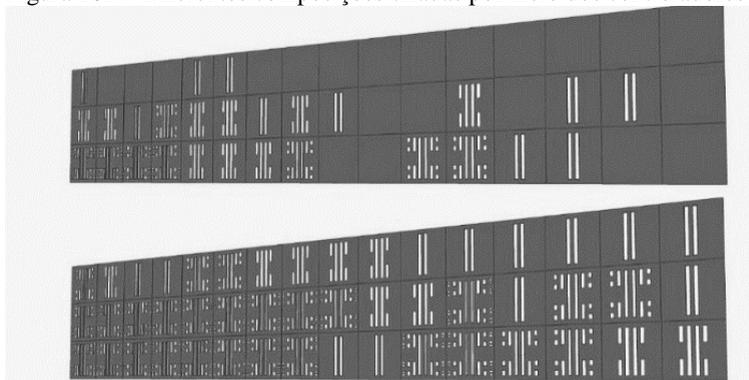
Fonte: O autor

Figura 101 – Diferentes composições criadas por meio dos controladores I. I.



Fonte: O autor

Figura 102 – Diferentes composições criadas por meio dos controladores I.



Fonte: O autor

Os painéis podem ser organizados de acordo com algumas premissas do programa, interpretando o uso e as deficiências que o projeto deve atender. É possível aumentar o intervalo numérico que corresponde aos painéis com maior número de iterações, caso deseje um ambiente que receba mais luz, controlando visualmente a posição das aberturas em relação à altura e uso do ambiente interno, ou modificando a organização a fim de construir a que mais lhe agrada em composição. Contudo, para organização das janelas numéricas, é necessário cuidado na escolha desses valores, pois eles sempre devem receber um acréscimo positivo. Caso isso não aconteça, possivelmente dois tipos de painéis irão ocupar o mesmo espaço, interferindo nas simulações e na futura contagem do *box-counting*.

### 3.5 VERIFICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO

Com os três passos anteriores concretizados, a composição de painéis com características da geometria fractal já está desenvolvida e agrupada conforme a radiação incidente na fachada, com isso todos os processos que resultam em um modelo tridimensional já estão prontos, sendo agora necessária a verificação das composições. Para essa parte do processo, foram desenvolvidas duas etapas: a averiguação do comportamento da luz natural nos ambientes internos e a constatação da dimensão fractal da composição e uma sequência de passos para se verificar a utilização do processo completo. Para utilização destas duas sequências, um conjunto de ações foi planejado para complementar e permitir comparar os diferentes resultados promovidos por esta etapa. O

funcionamento destas duas partes do processo pode ser visualizado através da figura 151 no apêndice C.

### **3.5.1 Verificação do Comportamento da Iluminação Interna**

A primeira etapa consiste em investigar como a luz se comporta na parte interna da edificação. Para examinar o comportamento da iluminação foram empregadas simulações dinâmicas, permitindo a análise do andar completo ou a avaliação dos diferentes espaços caso eles fossem divididos. As simulações nesta etapa utilizaram o plug-in DIVA e também os parâmetros descritos pela tabela 13 (Apêndice A).

Esta simulação leva em consideração todas as edificações do entorno, os elementos que compõem a construção e os painéis em sua respectiva formação. Cada um destes elementos possuem diferentes índices de reflexão, que são descritos pela tabela presente na figura 141 (Apêndice A). Para confirmar a utilização dos elementos nas simulações que compõem o processo, câmeras foram alocadas e os mesmos elementos que compunham os componentes de simulação eram anexados aos de visualização. Permitindo, com isto, visualizar de maneira renderizada o ambiente e verificar os elementos que estão sendo computados pelo componente de simulação. As figuras 103 e 104 mostram, respectivamente, por meio de imagens, as partes que compõem o processo para fazer as simulações e para verificar os componentes utilizados

Figura 103 – Parte do processo que promove a simulação.

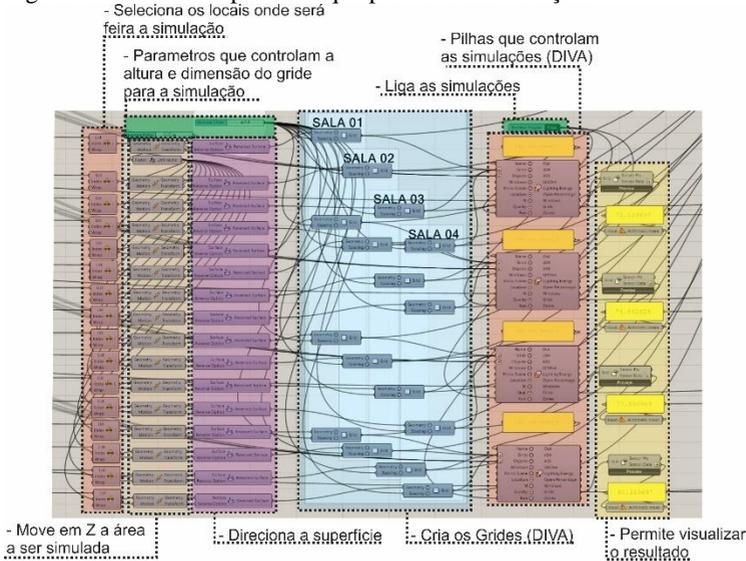
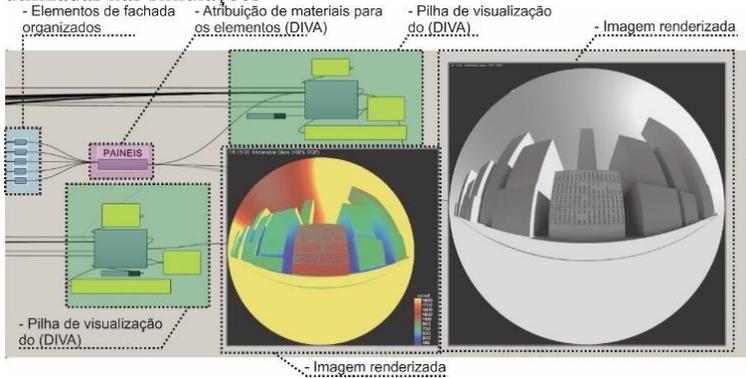


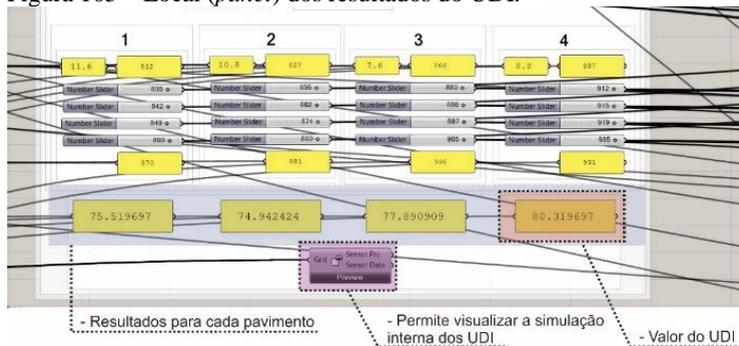
Figura 104 – Resultado dos componentes que permitem visualizar as geometrias utilizadas nas simulações



Os resultados, das simulações de cada andar, são transmitidos por painéis para os controladores que comandam a posição de cada iteração dos painéis, estes controladores demonstram o comportamento da iluminação pelo UDI. Com as simulações, é possível ajustar a composição e, na sequência, simular o comportamento da iluminação até o momento

que o índice do UDI seja adequado ao projetista. A figura 105 demonstra esta parte do processo.

Figura 105 – Local (*panel*) dos resultados do UDI.



Fonte: O autor

### 3.5.2 Verificação da Dimensão Fractal

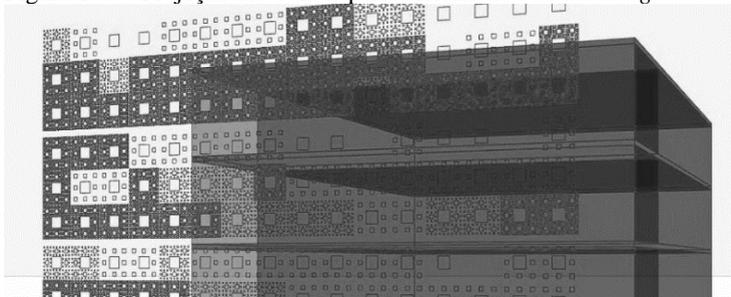
Outro resultado esperado para a etapa de verificação é a constatação da dimensão fractal da composição dos painéis por meio do *box-counting*. Para esta parte do processo, as curvas que compõem os painéis são sobrepostas em uma malha que preenche o espaço utilizado para os elementos de fachada. Por meio da sobreposição entre as curvas e a matriz, são contabilizados todos os espaços que preenchem a malha, e os espaços que estão em conflito com alguma curva que compõe o desenho dos elementos de fachada. Após esta contagem é feito o logaritmo destes dois números e, na sequência, o resultado logarítmico de toda a malha é dividido pelo logaritmo do número de espaços preenchidos pela curva. O resultado desta primeira divisão é a dimensão fractal para a primeira malha do *box-counting*.

O processo descrito acima é realizado três vezes e tirada a média, sendo que cada uma das malhas utilizadas possui um número diferente de elementos. Cada elemento de fachada é dividido em uma matriz de quatro por quatro (4x4), na sequência, é feita uma divisão de oito por oito (8x8) para cada painel, e a malha que possui as menores divisões é constituída por uma matriz de doze por doze (12x12).

O objetivo desta etapa do processo é alcançar uma dimensão fractal da composição mais próxima de valores entre 1.3 e 1.5, pois estes valores proporcionam respostas positivas para a percepção humana. O valor resultante do *box-counting* é transmitido por um painel localizado junto

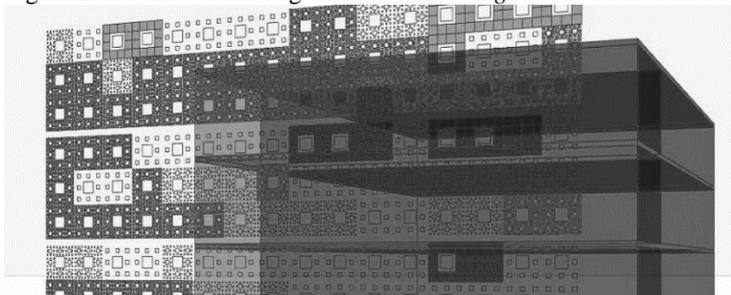
às janelas de controle da composição. O modo como funciona o *box-counting* pode ser observado pelas figuras 106 a 109. O processo que permite a contagem da dimensão fractal é identificado pela figura 110 e o painel que mostra o resultado da contagem aparece na figura 111.

Figura 106 – Projeção das curvas para a leitura do *box-counting*.



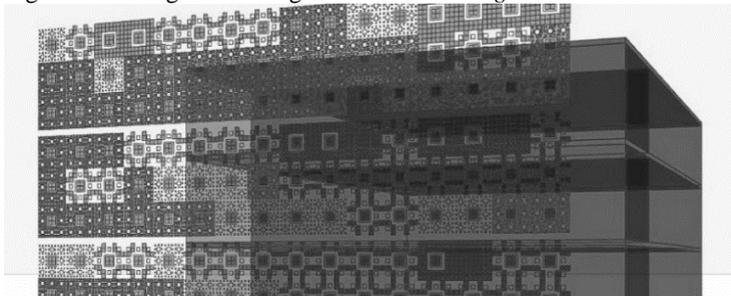
Fonte: O autor

Figura 107 – Primeira contagem do *Box-counting*.



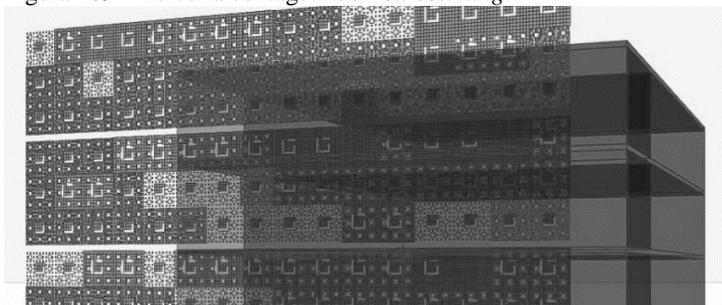
Fonte: O autor

Figura 108 – Segunda contagem do *Box-counting*.



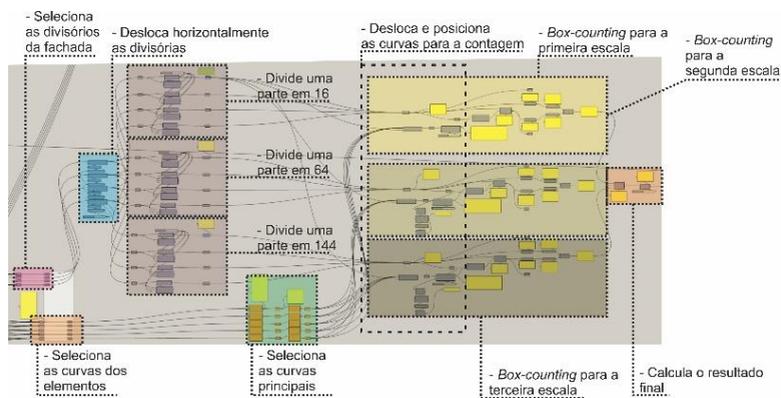
Fonte: O autor

Figura 109 – Terceira contagem do *Box-counting*.



Fonte: O autor

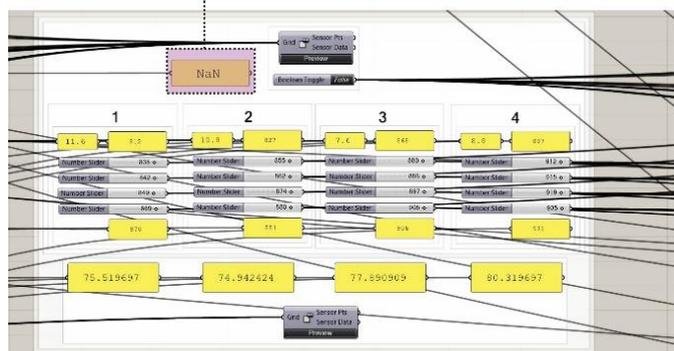
Figura 110 – Processo para o *box-counting*.



Fonte: O autor

Figura 111 – Localização do quadro com o resultado do *box-counting*.

- Resultado da dimensão fractal

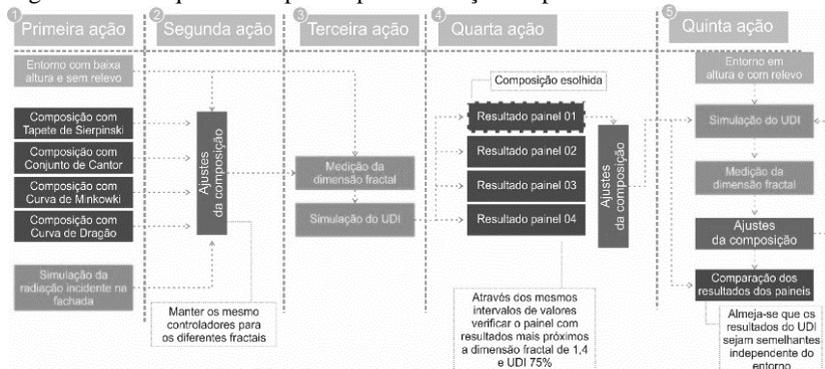


Fonte: O autor

### 3.5.3 Sequência de Passos para Verificação da Composição

Para o desenvolvimento desta etapa, além de compor os processos que permitem verificar os diferentes comportamentos, criou-se uma sequência de cinco passos para a sua utilização, a figura 112 esquematiza as etapas.

Figura 112 – Sequência de passos para validação do processo.



Fonte: O autor

Inicialmente um entorno genérico com baixa altura é ajustado e, em seguida, é simulada a radiação incidente sob a construção modelo. Os parâmetros utilizados na modelagem do entorno, para esta etapa, podem ser verificados pelas tabelas presentes na figura 141 (Apêndice A), e os valores utilizados na pilha do DIVA, para a simulação dinâmica, estão na tabela 13 (Apêndice A).

Na sequência é escolhido um dos quatro painéis fractais desenvolvidos para fazer as diferentes simulações. Assim, inicialmente, os quatro tipos de elementos de fachada têm suas composições ajustadas, em um mesmo intervalo, para fazer uma primeira simulação da dimensão fractal.

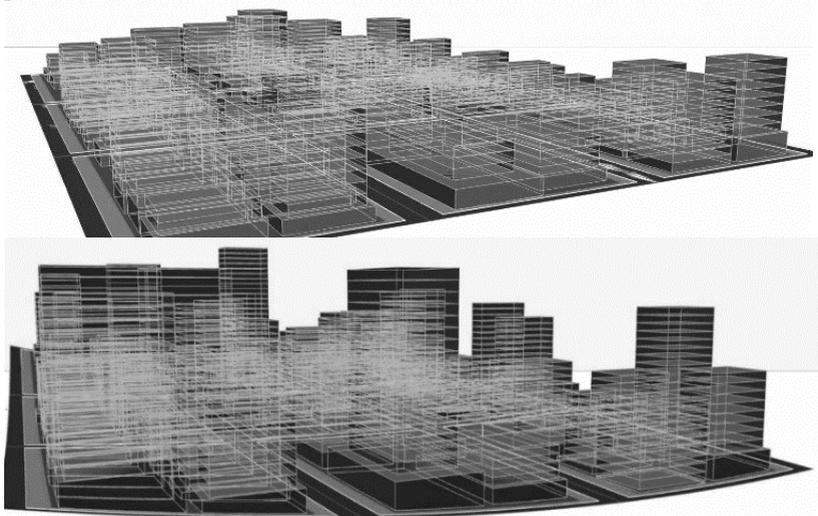
Em seguida, iniciam-se as contagens com o *box-counting* e verifica-se a dimensão fractal gerada de cada composição para um mesmo intervalo dos controladores. Tendo os resultados da dimensão fractal, é simulado o comportamento interno da iluminação por meio do UDI para cada tipo de arranjo de painéis.

Com os diferentes resultados obtidos, tanto da dimensão fractal quanto de UDI, é escolhido o tipo de elemento de fachada que apresenta as melhores respostas para cada índice. Para dimensão fractal procura-se

um valor 1,4D e para UDI uma porcentagem superior a 70% do tempo no ambiente. Este painel tem seus resultados tabelados para utilização nas comparações que acontecem na sequência.

Na sequência o entorno é modificado, sendo composto por construções verticais e relevo acidentado, como demonstra a figura 113. Usando do mesmo tipo de fractal escolhido na etapa anterior, e ajustando os diferentes intervalos que compõem a organização dos elementos de fachada, obtém-se um resultado lumínico e da dimensão fractal semelhante ao alcançado anteriormente. Demonstrando, assim, que o processo paramétrico desenvolvido alcançou a proposta de desenvolver e de compor elementos de fachada com características da geometria fractal, levando em consideração diferentes variáveis de entorno, como altura e relevo.

Figura 113 – Altura do entorno para a primeira e segunda sequência de testes do processo.



Fonte: O autor

### 3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como resultado do processo paramétrico, criaram-se elementos, arranjos e simulações, capazes de desenvolver, potencializar e organizar diferentes elementos geométricos com características de fractais lineares. Os elementos criados por este processo podem receber diferentes atribuições quando utilizados em fachadas, tornando-se um instrumento

de identidade e composição que busca por possíveis respostas psicológicas positivas, bem como elemento de sombreamento e distribuição da luz natural interna. O processo demonstrou ser um instrumento capaz de criar diferentes resultados, por meio de modificações ao longo da sua estruturação; pelas composições cabíveis de serem desenvolvidas e por alterações na organização dos painéis em consequência das simulações.

Separadamente, as etapas que constituem o processo possibilitam diferentes resultados como: recriar um ambiente externo para diferentes simulações (etapa metodológica 3.2.1 e 3.2.2); desenvolver diferentes elementos arquitetônicos, através de dez conceitos lineares da geometria fractal (etapa metodológica 3.3.1); avaliar diferentes protetores solares e potencializá-los acrescentando espessura por meio de um componente generativo (etapa metodológica 3.3.3); orientar e organizar elementos de fachada por meio da radiação incidente consequente de um entorno (etapa metodológica 3.4.1 e 3.4.2); averiguar o comportamento da luz natural em um ambiente interno (etapa metodológica 3.5.1); e verificar a dimensão fractal de diferentes composições (3.5.2).

Individualmente, cada uma dessas etapas pode ser desvendada e anexada a outros processos diferentes. Contudo, seguindo a sequência desta pesquisa, as etapas resultam na criação de um processo paramétrico que utiliza a dimensão fractal e o comportamento lumínico no desenvolvimento e organização de elementos de fachada com características da geometria fractal.

### **3.6.1 Resultados da Dimensão Fractal na Sequencia de Verificação do Processo**

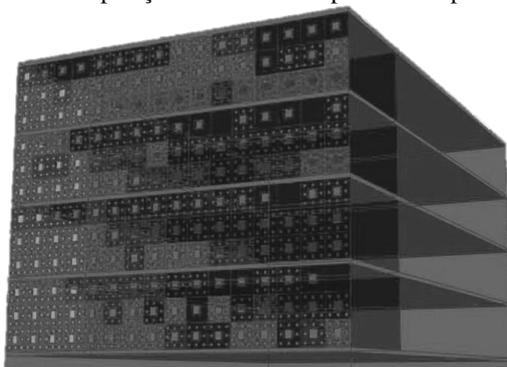
Durante a etapa de verificação do processo, os quatro diferentes tipos de painéis foram organizados com o mesmo arranjo compositivo. Possibilitando verificar quais dos quatro padrões fractais apresentam os índices da dimensão fractal mais próximos ao intervalo de 1,3D a 1,5D. Os resultados destas organizações podem ser observados pela tabela 7 e pelas figuras 114 a 117.

Tabela 7 – Resultados da dimensão fractal.

<b>Tipo de Fractal</b>	<b>Curva de Minkowski</b>	<b>Conjunto de Cantor</b>	<b>Curva de Dragão</b>	<b>Tapete de Sierpinski</b>
<b>D. Fractal</b>	1.08D	1.12D	1.14D	1.25D

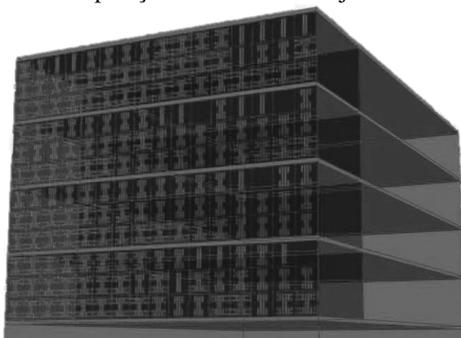
Fonte: O autor.

Figura 114 – Composição feita com o Tapete de Sierpinski.



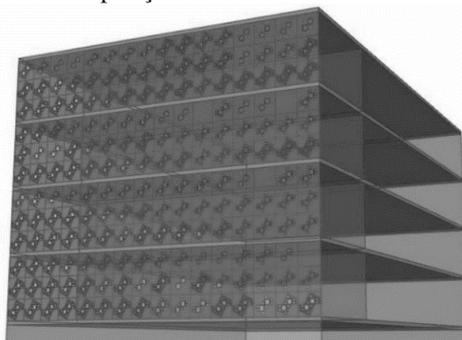
Fonte: O autor

Figura 115 – Composição feita com o Conjunto de Cantor.



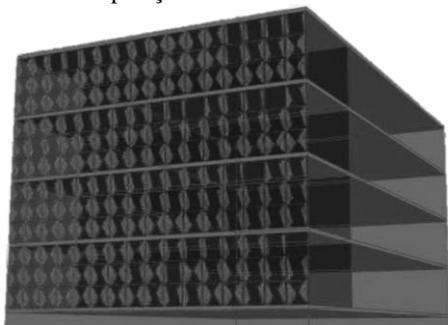
Fonte: O autor

Figura 116 – Composição feita com o Curva de Minkoski.



Fonte: O autor

Figura 117 – Composição feita com o Curva de Dragão.



Fonte: O autor

O intervalo numérico, utilizado para esta primeira organização, foi ajustado para buscar uma dimensão fractal superior a 1,3D e para possibilitar a contemplação visual do entorno a partir do ambiente interno. Contudo, nos resultados desta primeira verificação (dimensão fractal), pode-se constatar que mesmo com um intervalo maior para os valores, que correspondem aos painéis com mais aberturas (mais iterados), o preenchimento dos espaços pelo *box-counting* ainda não foi suficiente de modo a alcançar uma dimensão superior a 1,3D.

Isto pode ser atribuído ao número de iterações que os elementos de fachada foram submetidos (4 iterações), pois como a terceira contagem do *box-counting* avalia espaços bastante reduzidos, uma área maior e mais fragmentada é necessária para se preencher esses espaços. Esta verificação possibilitou fazer a associação de que quanto maior o número de iterações utilizadas nos elementos que compõem a fachada, maior será a probabilidade de criarem composições com dimensões fractais superiores.

### 3.6.2 Resultados do Comportamento Lumínico na Sequência de Verificação do Processo

A partir dos resultados das dimensões dos fractais iniciaram-se as simulações que demonstram o comportamento da iluminação interna através do UDI. Contudo, durante os testes, os painéis desenvolvidos com o Tapete de Sierpinski tiveram de ser descartados, pois os elementos desenvolvidos com este fractal geraram uma geometria que demandava uma alta capacidade de processamento e o hardware, utilizado no computador da pesquisa, mostrou-se insuficiente, ainda que reduzindo ao máximo os parâmetros de simulação das pilhas do DIVA. Porém, mesmo

com o descarte deste painel, os testes para a validação do processo ainda são válidos, uma vez que os outros três elementos de fachada permitem continuar as demais análises.

Os painéis foram avaliados utilizando uma mesma janela de valores (kw/h). Estes valores são os mesmos para a constatação da dimensão fractal e estão organizados de modo a criar intervalos entre os valores mínimos e máximos da radiação incidente na fachada para cada andar. Os diferentes valores com relação aos elementos de fachada podem ser observados pela tabela 8.

Tabela 8 – Intervalo dos valores de radiação para a organização dos painéis para o entorno com baixo número de pavimentos

(kw/h)	1ºAndar	2º Andar	3º Andar	4ºAndar
<b>4º Iteração</b>	804-835kw/h	839-855kw/h	861-880kw/h	894-912kw/h
<b>3º Iteração</b>	836-842kw/h	856-862kw/h	881-886kw/h	913-915kw/h
<b>2º Iteração</b>	843-851kw/h	863-879kw/h	887-897kw/h	916-919kw/h
<b>1º Iteração</b>	852-858kw/h	880-881kw/h	898-901kw/h	920-935kw/h
<b>Painel Opaco</b>	859-859kw/h	882-882kw/h	902-902kw/h	936-936kw/h

Fonte: O autor.

Os resultados dos UDIs médios demonstraram que o tipo de elemento de fachada que apresentou os melhores índices foi o Conjunto de Cantor, pois os valores foram superiores aos demais, como demonstrado pela tabela 9. Os resultados visuais da medição do UDI, para este fractal e para os demais, podem ser observados na figura 147 (Apêndice B).

Tabela 9 – Resultados UDI médio para cada andar e tipo de fractal.

Tipo de Fractal	Curva de Minkwski	Conjunto de Cantor	Curva de Dragão	Tapete de Sierpinski
<b>Dimensão D</b>	1.08D	1.12D	1.14D	1.25D
<b>UDI 1 andar</b>	76.92%	80.42%	79.10%	X
<b>UDI 2 andar</b>	76.75%	79.90%	77.71%	X
<b>UDI 3 andar</b>	76.12%	80.23%	77.65%	X
<b>UDI 4 andar</b>	77.10%	81.64%	79.84%	X

Fonte: O autor.

Esta medição permitiu identificar que não há relação direta entre a dimensão fractal e o comportamento da luz natural, como demonstrado anteriormente pela tabela 9. Para os três painéis utilizados nas simulações identificou-se que com o aumento da dimensão fractal, maior é a

quantidade de luz natural no ambiente interno, pois na medida em que se buscava alcançar os índices da dimensão fractal de 1.3D, observou-se um ganho na quantidade de luz natural. Contudo, esta relação não é absoluta, pois o painel que apresentava o valor mais elevado da dimensão fractal (Curva de Dragão) não apresentou os melhores índices lumínicos. E o fator que contribui para a não conexão dos resultados pode estar relacionado com a construção da composição através de diferentes etapas independentes, como: a organização dos elementos; seu *design*; e características individuais.

Analisando os resultados dos UDIs optou-se pelos elementos desenvolvidos por meio do Conjunto de Cantor para a validação do processo. Com os elementos desenvolvidos por esse fractal, o objetivo era alcançar resultados semelhantes aos identificados nesta análise, mas utilizando um entorno provido de menos iluminação natural, consequente de um relevo acidentado e construções perimetrais mais altas.

A seguinte simulação (para teste) utilizou a mesma janela de intervalos, mas com um entorno acidentado e com as construções em maior altura. Esta análise dos UDIs resultou em um decréscimo na quantidade de luz natural. Após esta verificação, uma nova janela de intervalos foi continuamente ajustada, até se alcançar resultados próximos aos medidos anteriormente. O intervalo final ajustado é demonstrado pela tabela 10.

Tabela 10 – Intervalo de valores para a organização dos painéis, para um entorno com edifícios com mais pavimentos e relevo acidentado (2º teste).

	1º Andar	2º Andar	3º Andar	4º Andar
<b>4º Iteração</b>	511-560kw/h	549-588kw/h	595-620kw/h	618-645kw/h
<b>3º Iteração</b>	561-575kw/h	589-593kw/h	621-635kw/h	646-660kw/h
<b>2º Iteração</b>	576-579kw/h	594-605kw/h	636-642kw/h	661-670kw/h
<b>1º Iteração</b>	580-581kw/h	606-607kw/h	643-644kw/h	671-673kw/h
<b>Painel Opaco</b>	581-581kw/h	607-608kw/h	644-644kw/h	674-674kw/h

Fonte: O autor.

### 3.6.3 Comparações dos Resultados da Sequência de Verificação do Processo

Ao comparar os resultados das duas organizações dos elementos de fachada, nota-se que o processo paramétrico possibilita criar composições que podem se adaptar a diferentes entornos, criando arranjos que se adéquam às distintas intenções de projeto. Na pesquisa optou-se

pela iluminação natural interna com intuito de alcançar o índice do UDI superior a 70% para um entorno baixo e alto. Já com relação a organização dos elementos, o objetivo era alcançar uma dimensão fractal próxima ao intervalo de 1,3D e 1,5D.

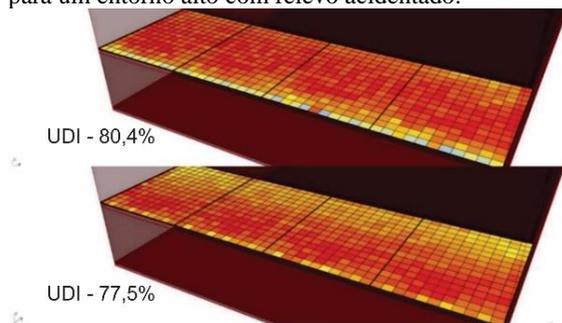
A partir da comparação dos resultados dos UDIs, foi identificado que eles apresentam resultados semelhantes, mesmo tendo condicionantes de insolação distintas. Demonstrando, assim, que os controladores, que ajustam a locação dos painéis, permitiram organizar os elementos de modo a fazer diferentes alterações na composição condicionando resultados lumínicos semelhantes. Os resultados podem ser visualizados pela tabela 11 e nas figuras 118 a 121.

Tabela 11 – Resultado do UDI com novo intervalo de valores para a composição dos elementos de fachada para um entorno alto e relevo acidentado.

UDI	1 Andar	2 Andar	3 Andar	4 Andar
<b>Entorno Baixo.</b>	80.42%	79.90%	80.23%	81.64%
<b>Entorno Alto.</b>	72.50%	72.18%	73.37%	75.15%
<b>Entorno Alto (2° composição)</b>	77.51%	77.94%	79.89%	80.31%

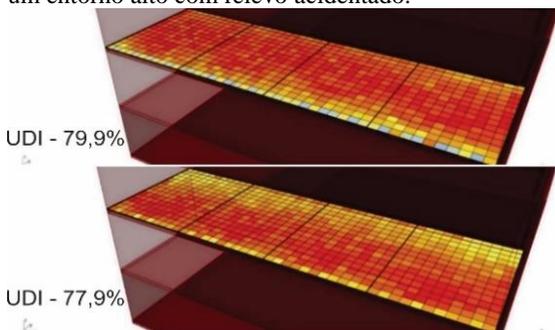
Fonte: O autor.

Figura 118 – Resultado UDI para o Conjunto de Cantor no 1º pavimento para um entorno provido de luz natural seguido do resultado deste mesmo fractal para um entorno alto com relevo acidentado.



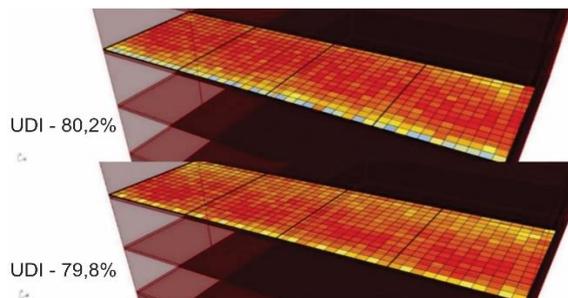
Fonte: O autor

Figura 119 – Resultado UDI para o Conjunto de Cantor no 2º pavimento para um entorno provido de luz natural seguido do resultado deste mesmo fractal para um entorno alto com relevo acidentado.



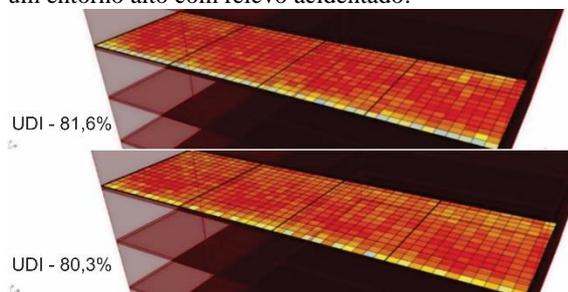
Fonte: O autor

Figura 120 – Resultado UDI para o Conjunto de Cantor no 3º pavimento para um entorno provido de luz natural seguido do resultado deste mesmo fractal para um entorno alto com relevo acidentado.



Fonte: O autor

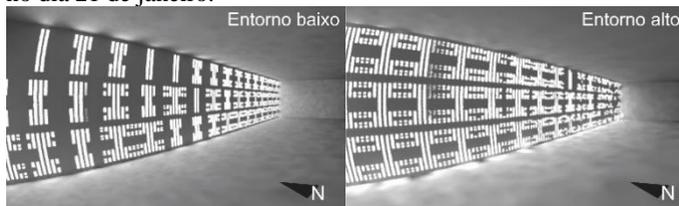
Figura 121 – Resultado UDI para o Conjunto de Cantor no 3º pavimento para um entorno provido de luz natural seguido do resultado deste mesmo fractal para um entorno alto com relevo acidentado.



Fonte: O autor

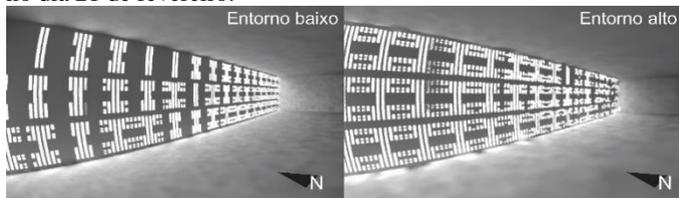
Para a visualização dos diferentes resultados lumínicos doze imagens diferentes foram feitas, com a mesma hora e dia, para cada mês do ano, podendo assim, avaliar o resultado do comportamento da luz natural no ambiente para os dois arranjos. O resultado desta comparação pode ser observado pelas figuras 122 a 133.

Figura 122 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de janeiro.



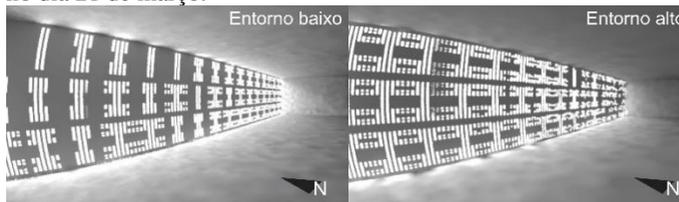
Fonte: O autor.

Figura 123 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de fevereiro.



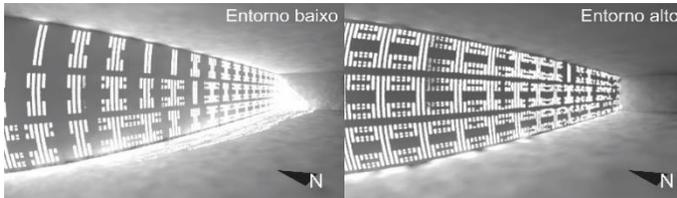
Fonte: O autor.

Figura 124 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de março.



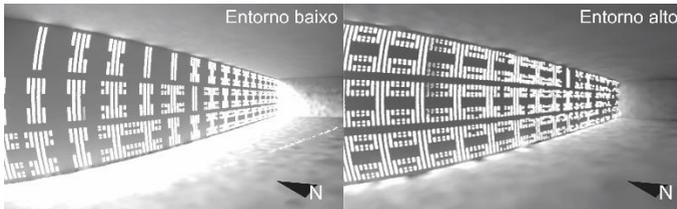
Fonte: O autor

Figura 125 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de abril.



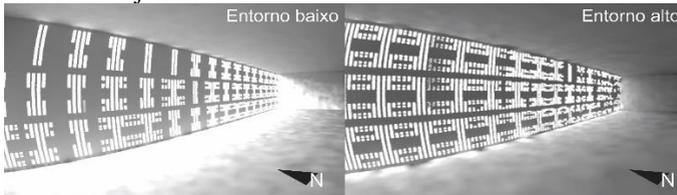
Fonte: O autor.

Figura 126 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de maio.



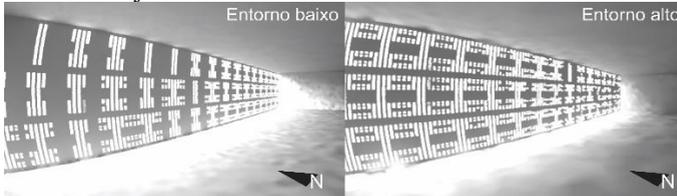
Fonte: O autor.

Figura 127 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de junho.



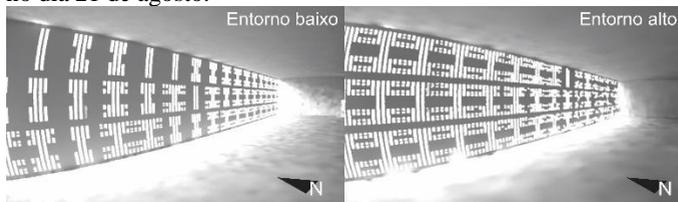
Fonte: O autor.

Figura 128 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de julho.



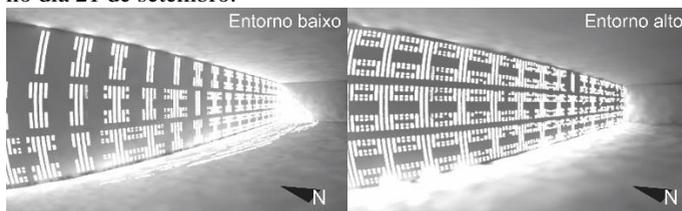
Fonte: O autor

Figura 129 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de agosto.



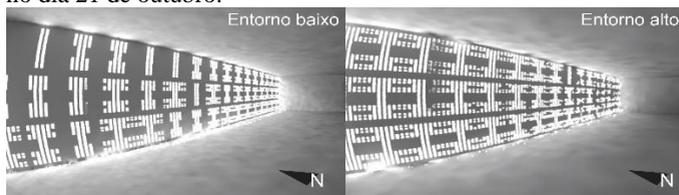
Fonte: O autor.

Figura 130 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de setembro.



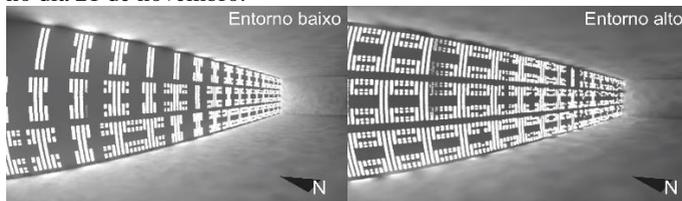
Fonte: O autor.

Figura 131 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de outubro.



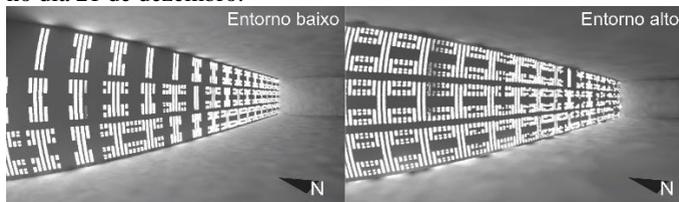
Fonte: O autor.

Figura 132 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de novembro.



Fonte: O autor.

Figura 133 – Comparação interna 1º andar, Conjunto de Cantor, para as 15:00 no dia 21 de dezembro.



Fonte: O autor.

Observando a dimensão fractal das duas composições, pode-se notar que quanto maior for a área utilizada, que preenche a superfície que compreende o fractal, maior será a dimensão fractal alcançada. Porém, mesmo com uma grande área ocupada na segunda organização (utilizando painéis com a última iteração), ainda não se alcançou o intervalo entre o 1.3D e 1.5D. Demonstrando que um número maior de iterações é necessário para que o resultado da composição seja mais fragmentado. O resultado da comparação da dimensão fractal pode ser observado pela tabela 12.

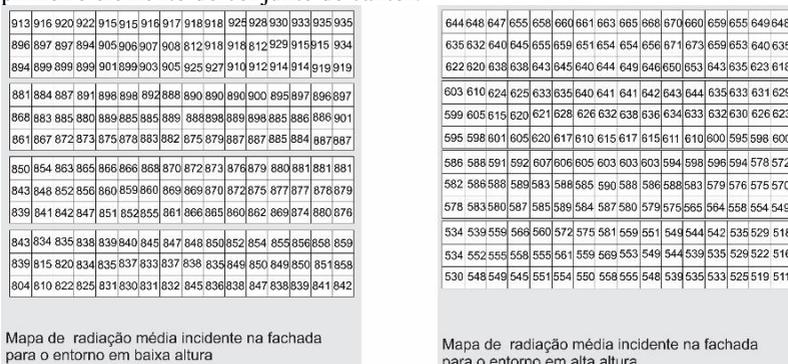
Tabela 12 – Resultados UDIs, (entorno baixo e alto).

	1º Composição	2º Composição
<b>Dimensão Fractal</b>	1.12D	1.21D

Fonte: O autor.

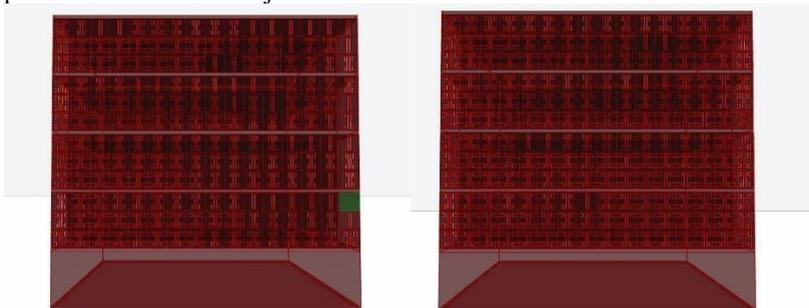
Avaliando estas organizações, observou-se que diferentes intervalos de composição são necessários para cada padrão fractal, pois suas características e padrões diferenciados tornam seus resultados singulares, tendo uma dimensão fractal e comportamento lumínico dependentes para a regra e o design que é escolhido. Com relação aos ganhos de luz, não é possível afirmar que a utilização da geometria fractal é superior ou vantajosa em relação a outros padrões geométricos. Porque os resultados, provenientes de seus usos, estão em acordo com o design baseado na regra fractal escolhida, com os diferentes elementos envolvidos (espessura, estruturas, entre outros) e com o modo como a composição é organizada. As figuras 134 a 139 mostram o local de inserção de cada tipo de painel nos dois momentos avaliados (em um entorno com poucos pavimentos e sem relevo e com relevo acidentado e mais pavimentos). Para comparar os resultados em termos de composição, uma imagem com os dois arranjos desenvolvidos foi humanizada, representando o resultado final do processo (figura 140).

Figura 134 – Comparação entre as composições com entorno baixo e alto para o primeiro elemento do conjunto de cantor.



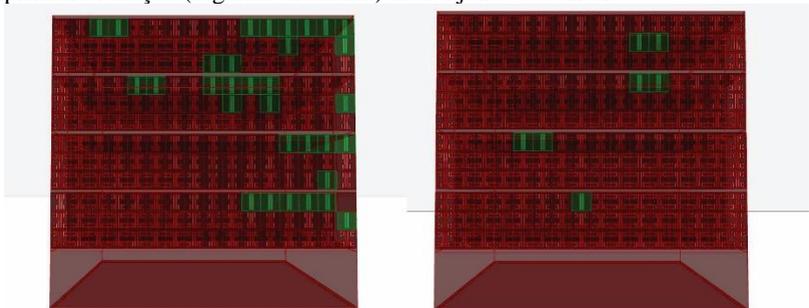
Fonte: O autor.

Figura 135 – Comparação entre as composições com entorno baixo e alto para o primeiro elemento do conjunto de cantor.



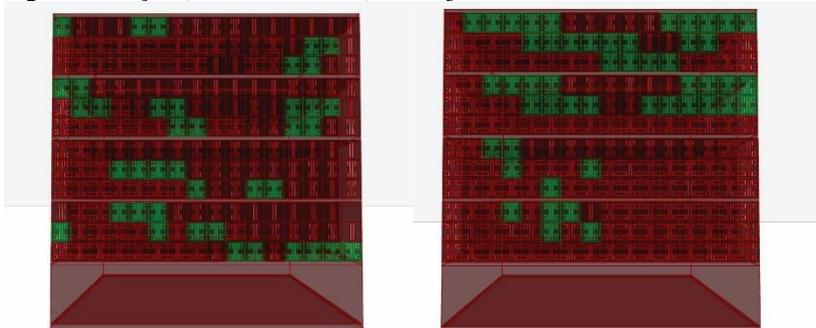
Fonte: O autor.

Figura 136 – Comparação entre as composições com entorno baixo e alto para a primeira iteração (segundo elemento) do conjunto de cantor.



Fonte: O autor.

Figura 137 – Comparação entre as composições com entorno baixo e alto para a segunda iteração (terceiro elemento) do conjunto de cantor.



Fonte: O autor.

Figura 138 – Comparação entre as composições com entorno baixo e alto para a terceira iteração (quarto elemento) do conjunto de cantor.



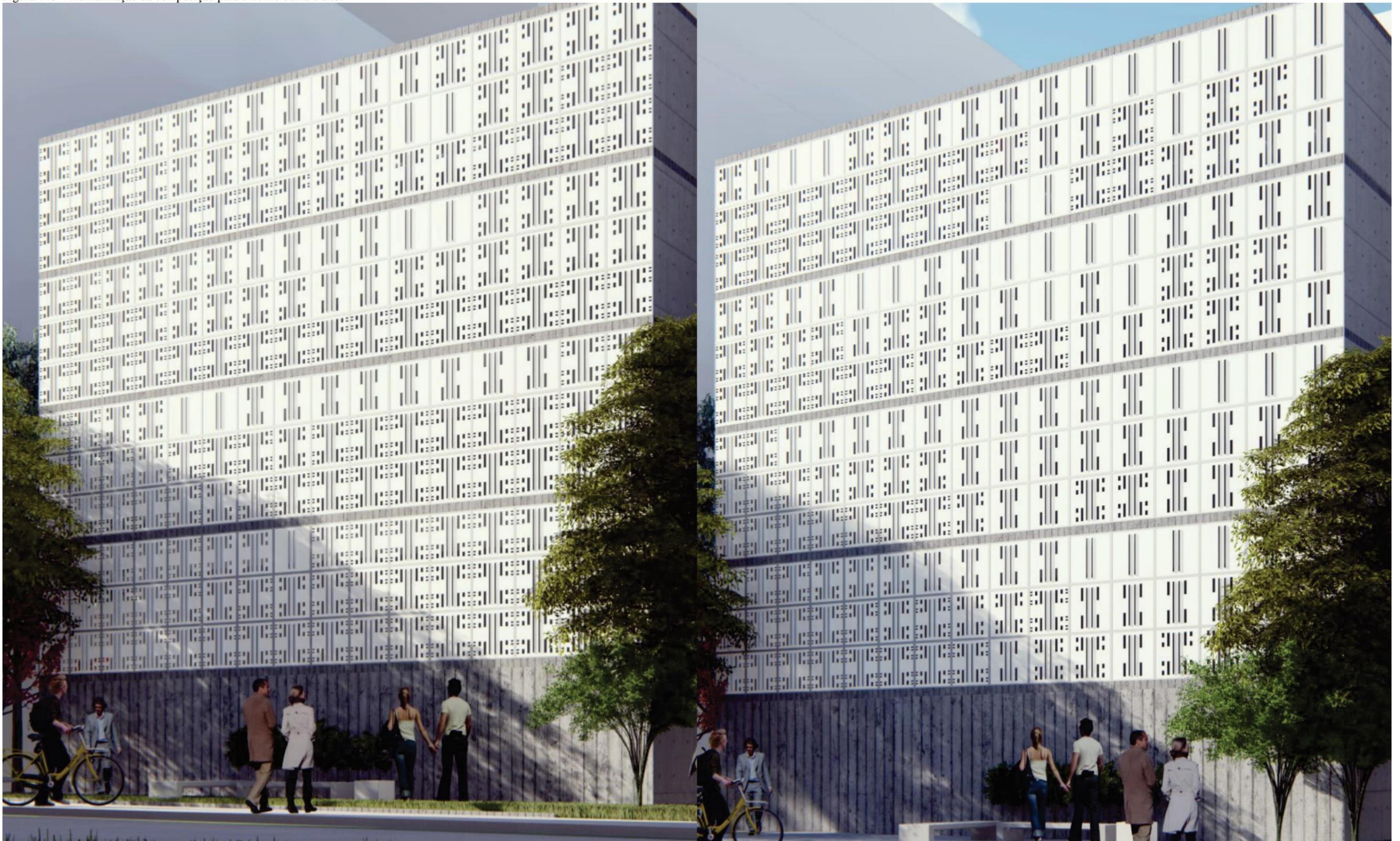
Fonte: O autor.

Figura 139 – Comparação entre as composições com entorno baixo e alto para a quarta iteração (quinto elemento) do conjunto de cantor.



Fonte: O autor.

Figura 140 – Humanização da composição para entorno baixa e alto.



Fonte: O autor.



## 4 CONCLUSÕES

A partir do desenvolvimento do processo e por meio da sequência de testes realizada para a verificação do mesmo, diferentes aspectos puderam ser observados, e com isso, três conclusões foram identificadas. Sendo elas: o entendimento das etapas existentes para a sua formação; as potencialidades da utilização e manipulação da dimensão fractal e sua utilização como geometria base para a construção de elementos de fachada; e os conhecimentos ou a equipe necessária para operá-lo.

A construção do processo resultou na identificação de quatro grandes etapas que o compõe: **Ambiente, Escolha, Organização e Simulação** – já descritos com seus diferentes níveis de aprofundamento nos procedimentos metodológicos. Estes quatro passos definem uma base geral para o processo, criando um traçado de ações que resultam na composição e avaliação dos elementos de fachada com características fractais. Pode-se afirmar que esta estrutura, consequente de um framework de diferentes conhecimentos, também pode ser utilizada como base para outros processos paramétricos que desejam um objetivo semelhante.

As quatro etapas também demonstraram ser uma sequência coerente para o desenvolvimento de métodos e processos que envolvam a geometria fractal, pois permitem utilizar e avaliar diferentes modelos fractais verificando o resultado do seu consequente uso. Cada estágio foi desenvolvido para concluir um objetivo singular, permitindo que diferentes alterações não influenciem na continuidade do todo. O primeiro passo executado (**Ambiente**) possibilita criar entorno e edifício paramétricos. A segunda etapa (**Escolha**) desenvolve painéis por meio de regras fractais, permite escolher os painéis com maior potencialidade, e acrescentar elementos e avaliá-los por meio de um algoritmo genético. O passo seguinte (**Organização**) une as duas etapas anteriores, além dos elementos de fachada. E a última fase (**Simulação**), verifica esta organização resultante do processo completo, avaliando a consequente resposta lumínica e a dimensão fractal.

O desenvolvimento destas quatro etapas individuais permite que diferentes alterações possam ser executadas, modificando o *design* da construção sem que o objetivo geral do processo seja alterado. Alterações como: modificar as diferentes regras que compõem os fractais; mudar os elementos que os complementam; modificar o relevo; alterar entorno; remodelar a construção que recebe os elementos de fachada, aumentar ou diminuir o número de painéis; e modificar suas proporções e composição.

Estas diferentes modificações foram analisadas junto da última parte do método, que consistia em verificar o funcionamento do processo completo, alterando diferentes parâmetros. Identificando a possibilidade de gerar composições com diferentes cenários de entorno e alcançar resultados lumínicos semelhantes. Em que os resultados decorrentes destes testes podem ser verificadas nos subcapítulos seguintes.

Esta sequência de estágios apresenta diferentes suposições para outros usos. Como na construção de diferentes processos paramétricos, que envolvam diversas formas, usos e índices (térmicos, acústicos, sensoriais, físicos, etc.), ou na utilização de outras características e padrões da geometria fractal com outras finalidades, estrutura, conforto, etc.

A segunda interpretação obtida, com o desenvolvimento do processo, envolve a relação entre o número de iterações que os elementos fractais possuem e seu possível índice da dimensão fractal. Os resultados da contagem do *box-counting* mostraram-se na média de 1,05D e 1,20D. Para que a composição obtivesse um número superior neste índice, era necessário organizar o intervalo das janelas de modo que mais painéis iterados fossem utilizados. Analisando os resultados apresentados pelo *box-counting* foi identificado que, para atingir índices superiores da dimensão fractal, a curva que desenha os painéis necessitava cobrir a maior área possível e ser rugosa, pois nas contagens mais avançadas (com caixas menores a serem preenchidas), quanto mais quebra-diças forem as linhas que a compõe, maior será a contagem de caixas. Assim, para que o experimento obtivesse resultados mais favoráveis com este índice, era necessário retornar para a etapa de escolha e gerar mais iterações. Com isto, foi possível verificar que quanto mais iterações uma geometria fractal possuir, maior a probabilidade de apresentar índices da dimensão fractal altos.

Outra particularidade, constatada na pesquisa, a respeito da utilização dos elementos com característica da geometria fractal, é a potencialidade da utilização desta geometria como base de *design* para a confecção de diferentes protetores solares, permitindo controlar o comportamento da iluminação natural dentro do ambiente interno, por meio de suas diferentes iterações. Os múltiplos ajustes, das janelas que controlavam a composição dos painéis, demonstraram diferentes resultados para o UDI com a utilização de apenas um tipo de fractal. Os diferentes ajustes feitos na etapa da escolha, também permitiram ampliar a potencialidade desta geometria na construção de protetores solares, possibilitando desenvolver variações para o design do fractal, criar mais iterações e ajustar as prateleiras de luz. Ampliando, assim, o leque dos

resultados dos índices lumínicos, permitindo um controle preciso do projetista.

O desenvolvimento e manuseio do processo requer uma série de conhecimentos específicos (como: programação; processos lógicos; simulação; e capacitação na área a ser aprofundada com o processo), que caso não sejam utilizados, podem comprometer a interpretação dos índices ou não aprovar o seu uso. A leitura dos índices (referentes à iluminação natural) apresenta importância significativa para a continuidade do trabalho, fazendo com que os elementos e detalhes pertinentes ao trabalho sejam avaliados e escolhidos corretamente, sem resultar em formas e composições equivocadas.

Para desenvolver geometrias, que apresentam características da geometria fractal, com diferentes finalidades arquitetônicas é necessário o aprofundamento dos conhecimentos sobre a disciplina que norteará a sua criação e avaliação. De modo que os demais passos do processo (Organização e Simulação) tenham resultados sem erros.

#### 4.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

O trabalho apresentou limitações, em diferentes etapas, relacionadas com a capacidade de processamento do *hardware* utilizado para fazer as simulações. Durante a utilização do Galapagos, o tempo das simulações limitou, em alguns tipos de fractais, a quantidade de famílias geradas pelo *plug-in*, impossibilitando o aprofundamento de alguns dados. Na contagem do *box-counting*, o tempo para fazer a contagem dos espaços preenchidos também impossibilitava o desenvolvimento de um número maior de composições. A demora em obter os diferentes resultados do processo, como as simulações internas e a dimensão fractal, acarretou em dificuldades na coleta de dados. Em diferentes momentos, o processo precisava ser repetido algumas vezes para a que a leitura dos índices e das figuras fosse precisa.

Essa limitação também fez com que o fractal que apresentava os melhores resultados de dimensão fractal não pudesse ser avaliado em relação ao seu consequente comportamento da luz natural. Ocasionalmente, assim, na sua eliminação e na não constatação dos resultados mais promissores para esta pesquisa.

Outra limitação apresentada pelo trabalho foi na utilização de alguns parâmetros referentes à pilha do DIVA. Como exemplo, o arquivo climático utilizado para o *plug-in*, durante todo o processo das simulações, foi o BRA\_FLORIANOPOLIS838990\_SWERA, referente à cidade de Florianópolis, SC, Brasil, limitando a análise a esta região.

## 4.2 TRABALHOS FUTUROS

Cinco trabalhos futuros foram identificados com a conclusão do processo. O primeiro com relação à empregabilidade dos painéis como um produto, apontando como poderia ser o processo para materializá-los e construí-los. O segundo trabalho está relacionado com a ideia de montagem dos elementos de fachada, pensando no modo como estes podem ser operados, de forma manual ou roboticamente, para que se adaptem aos diferentes usos que o ambiente interno apresentar. O terceiro é a possibilidade de estudar a automação da abertura destes painéis, permitindo que por meio de um painel autômato, os outros possam se modificar (abrir, fechar, modelar, etc.) e gerar as diferentes alterações do padrão fractal. A quarta pesquisa é a respeito da investigação das reações sensoriais, como conforto, por exemplo, que as composições, consequentes do processo, poderiam gerar em diferentes usuários. E o quinto e último trabalho, diz respeito a validação das diferentes etapas identificadas em outras aplicações paramétricas.

Com o desenvolvimento dos elementos de fachada resultantes do processo paramétrico, há a possibilidade de materialização destes painéis. Criando a possibilidade de investigar outros comportamentos, variando o material, cor e tecnologia empregadas nos painéis. Este ensaio proporcionaria, também, a oportunidade de verificar o custo de produção e a empregabilidade de seu uso.

A transformação do resultado da pesquisa em um produto permitiria que fossem pensados para os painéis diferentes modos de instalação e organização. Para usos comerciais, a constante mudança da função do espaço, poderia resultar também, em uma mudança de perspectiva do usuário interno quanto à iluminação natural e vista. Com isso, o desenvolvimento de um sistema (manual ou robótico) que possibilita a troca das placas que compõe o arranjo, permitiria expansão na usabilidade do espaço interno, que poderia se adaptar a diferentes atribuições.

A terceira pesquisa, que poderia derivar deste trabalho, diz respeito ao desenvolvimento de um único painel autônomo que detivesse todas as iterações, e dependendo da variável (radiação ou temperatura), ele se modificasse (abrindo ou fechando), permitindo o controle de diferentes variáveis.

A pesquisa derivada deste trabalho é em consideração ao comportamento do usuário externo e interno, consequente da composição do processo paramétrico. Tendo como objetivo interpretar as diferentes respostas psicológicas e sensoriais. Por meio de modelos em escala ou

modelos em tamanho real, ou pelo uso da realidade virtual ou realidade aumentada. O usuário poderia interagir com os controladores, de modo que ele visualizasse o resultado em tempo real, para verificar se a composição construída se aproxima de determinadas dimensões fractais, e determinar se existe algum outro padrão preferencial aos usuários.

O estudo que se refere à construção e à validação de um modelo paramétrico que utilize da sequência de etapas identificada neste trabalho, tem por objetivo validar os quatro estágios aplicados durante a pesquisa. A fim de desenvolver um modelo arquitetônico completo, que faça diferentes tipos de simulação, utilize de normativas e tenha a capacidade de selecionar o resultado mais adequado. Este modelo poderia ser validado comparando os resultados de um outro modelo com as mesmas condicionantes e problemáticas de projeto desenvolvidas, por meio de programação com a sequência lógica, nesta pesquisa.



## 5 REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Christopher; ISHIKAWA, Sara; SILVERSTEIN, Murray. **A Pattern Language: Towns Buildings Construction**. Nova Iorque: Oxford University Press, 1977. 1218 p.

ALVEZ, Marcus Teixeira. **O Conjunto de Cantor**. 2008. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Matemática, Departamento de Matemática, Universidade Federal de Santa Catarina - Ufsc, Florianópolis, 2008.

ALSHOUBAKI, Hind et al. Innovative Design Strategy to Develop Facades Opening for a Commercial Building in Amman, Jordan. **International Journal Of Applied Engineering Research**, [s.l.], v. 11, n. 7, p.5288-5292, Não é um mês valido! 2016.

ANDERSON, Carl M.; MANDELL, Arnold J.. Fractal Time and the Foundations of Consciousness. **Fractals Of Brain, Fractals Of Mind**, [s.l.], p.75-85, 1996. John Benjamins Publishing Company. <http://dx.doi.org/10.1075/aicr.7.05and>.

ASSIS, Thiago Albuquerque de et al. Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s.l.], v. 30, n. 2, p.2304.1-2304.10, 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1806-11172008000200005>.

AZEVEDO JUNIOR, Delmir Peixoto de; CAMPOS, Renato de. Definição de requisitos de software baseada numa arquitetura de modelagem de negócios. **Production**, [s.l.], v. 18, n. 1, p.26-46, 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-65132008000100003>.

BARBOSA, Ruy Madsen. **Descobrimdo a Geometria Fractal: Para a sala de aula**. 3. ed. Campinas: Autêntica, 2007. 160 p.

BARNESLEY, Michael; HUTCHINSON, John E.; STENFLO, Örjan. V -variable fractals and superfractals. **Cornell University Library**, [s.l.], v. [1], n. [1], p.1-17, dez. 2003.

BAIER, Tânia; SEDREZ, Maycon. GEOMETRIA FRACTAL E ARQUITETURA. **VII CIBEM**, Montevideu, Uruguai, v. [1], n. [1], p.7349-7355, 2013.

BATTY, Michael; LONGLEY, Paul. **Fractal Cities: A Geometry of Form and Function**. San Diego: Academic Press, 1994. 310 p.

BONA, Cristina. **Avaliação de processos de software: um estudo de caso em XP e ICONIX**. 2002. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção., Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BOTELHO, Louise Lira Roedel; CUNHA, Cristiano Castro de Almeida; MACEDO, Marcelo. O MÉTODO DA REVISÃO INTEGRATIVA NOS ESTUDOS ORGANIZACIONAIS. **Gestão e Sociedade**, [s.l.], v. 5, n. 11, p.121-136, 2 dez. 2011. Revista Gestão e Sociedade. <http://dx.doi.org/10.21171/ges.v5i11.1220>.

BOYCE, P.r.. Illuminance Selection Based on Visual Performance—and other Fairy Stories. **Journal Of The Illuminating Engineering Society**, [s.l.], v. 25, n. 2, p.41-49, jul. 1996. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00994480.1996.10748146>.

BOVIL, Carl. **Fractal Geometry in Architecture and Design**. Nova Iorque: Birkhäuser Basel, 1996. 195 p.

CANTOR, Murray. **Object-Oriented Project Management with UML**. [s.1]: Wiley, 1998. 368 p.

CAPO, Daniele. The Fractal Nature of the Architectural Orders. **Nexus Network Journal**, [s.l.], v. 6, n. 1, p.30-40, abr. 2004. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00004-004-0004-9>.

CARTANA, Rafael Prado; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. Elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos. **Parc Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [s.l.], v. 7, n. 3, p.133-144, 31 out. 2016. Universidade Estadual de Campinas. <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v7i3.8647516>.

CARTANA, Rafael Prado; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay; BERTÉ, Eduardo João. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO

E LUMÍNICO DE ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR PROJETADOS ATRAVÉS DE MODELAGEM PARAMÉTRICA. **Xvi Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - Entac 2016**, São Paulo, v. [1], n. [1], p.1-16, set. 2016

CARPENTER, Loren C.. Computer rendering of fractal curves and surfaces. **Acm Siggraph Computer Graphics**, [s.l.], v. 14, n. , p.9-9, 1 jul. 1980. Association for Computing Machinery (ACM). <http://dx.doi.org/10.1145/988447.988449>.

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**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.121-137, mar. 2012. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1260/1478-0771.10.1.121>.

CHING, Francis D. K.. **Arquitetura - Forma, Espaço e Ordem**. 3. ed. São Paulo: Bookman, 2013. 456 p.

**COMPLEX SYSTEMS: SCIENCE AT THE EDGE OF CHAOS**. Helsinki University Of Technology: Heikki Hyötyniemi, 2004.

CONRADS, Ulrich. Programs and manifestos on 20th-century architecture. **The Mit Pres**, Cambridge, Massachusetts, v. [1], n. [1], p.1-96, Não é um mês válido! 1971. Traduzido por Michel Bullock.

COM. **RELATÓRIO DA COMISSÃO AO PARLAMENTO EUROPEU E AO CONSELHO**: Progressos alcançados pelos Estados-Membros para atingir níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético. Bruxelas: [s.1], 2016. 12 p.

COOPHIMMELBLAU. 2018. Disponível em: <<http://www.coop-himmelblau.at/>>. Acesso em: 13 mar. 2018

CORCUFF, Marie-pascale. Modularity and Proportions in Architecture and their Relevance to a Generative Approach to Architectural Design. **Nexus Network Journal**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.53-73, 13 jan. 2012. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00004-011-0097-x>.

CUNHA, Eduardo da. Mitos e verdades sobre o brise-soleil: da estética à eficiência energética. **Arquitetura Revista**, [s.l.], v. 7, n. 1, p.73-80, 30 jun. 2011. UNISINOS - Universidade do Vale do Rio Dos Sinos. <http://dx.doi.org/10.4013/arq.2011.71.07>.

CUTTING, James E.; GARVIN, Jeffrey J.. Fractal curves and complexity. **Perception & Psychophysics**, [s.l.], v. 42, n. 4, p.365-370, jul. 1987. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.3758/bf03203093>.

DURAND, Jean-nicolas-louis. **Précis of the Lectures on Architecture: With Graphic Portion of the Lectures on Architecture**. Los Angeles: Getty Publications, 2000. 346 p. Traduzido por David Britt.

EGLASH, Ron. **African Fractals: Modern Computing And Indigenous Design**. [s.l.]: Rutgers University, 1999. 265 p.

EMAMI, Niloufar; KHODADADI, Anahita; VON BUELOW, Peter. Design of a Shading Screen Inspired by Persian Geometric Patterns: An Integrated Structural and Daylighting Performance Evaluation. **Iass-slte 2014**, Brasília, v. [1], n. [1], p.1-11, set. 2014.

ERCAN, Burak; ELIAS-OZKAN, Soofia Tahira. Performance-based parametric design explorations: A method for generating appropriate building components. **Design Studies**, [s.l.], v. 38, p.33-53, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2015.01.001>.

FALCONER, Kenneth. **Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications**. 3. ed. Wiley-blackwell, 2014. 398 p.

FATHY, Fatma et al. CELLULAR AUTOMATA FOR EFFICIENT DAYLIGHTING PERFORMANCE:: OPTIMIZED FAÇADE TREATMENT. **Proceedings Of Bs2015**, Hyderabad, India, v. 14, p.2705-2711, dez. 2015.

FELLIPPE, Alexandre Reis. **Desempenho Luminoso e Energético de Vidros de Controle Solar e Dispositivos de Sombreamento**. 2016. 193f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2016.

FISCHER, Thomas; HERR, Cristiane M.. Teaching Generative. [s.1], [s.1], v. [1], n. [1], p.1-14, 2000.

FONSECA, Raphaela Walger da. **Iluminação natural e consumo energético de edificações não residenciais**: aplicação de redes neurais artificiais. 2015. 466 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, Florianópolis, 2015.

FRANKHAUSER, Pierre. **La fractalité des structures urbaines**. [s.1.]: Economica, 1994. 234 p.

GERBER, David Jason. **Parametric Practices: Models for Design Exploration in Architecture**. 2007. 2 v. Tese (Doutorado) - Curso de Harvard University Graduate School Of Design, Harvard, [s.1.], 2007.

GERBER, David Jason; LIN, Shih-hsin Eve. Designing in complexity: Simulation, integration, and multidisciplinary design optimization for architecture. **Simulation**, [s.1.], v. 90, n. 8, p.936-959, 9 abr. 2013. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0037549713482027>.

GIL, Antonio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p.

GÜRBÜZ, Esra; ÇAĞDAŞ, Gülen; ALAÇAM, Sema. A Generative Design Model for Gaziantep's Traditional Pattern. **City Modelling - Ecaade**, [s.1], v. 28, n. [1], p.841-849, 2010.

HAGERHALL, Caroline M; PURCELL, Terry; TAYLOR, Richard. Fractal dimension of landscape silhouette outlines as a predictor of landscape preference. **Journal Of Environmental Psychology**, [s.1.], v. 24, n. 2, p.247-255, jun. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvp.2003.12.004>.

HARRIS, James. Integrated Function Systems and Organic Architecture from Wright to Mondrian. **Nexus Network Journal**, [s.1.], p.93-101, 2007. Birkhäuser Basel. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7643-8519-4\\_6](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7643-8519-4_6).

HENEGHAN Peng Architects. 2018. Disponível em: <<http://www.hparc.com/>>. Acesso em: 13 mar. 2018.

HERNANDEZ, C. R. B. Parametric Gaudi. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 8, SIGRADI 2004, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, Brasil: UNISINOS, 2004, p. 213-215.

HERNANDEZ, Carlos Roberto Barrios. Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi. **Design Studies**, [s.l.], v. 27, n. 3, p.309-324, maio 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.006>.

HUTCHINSON, John E.. FRACTALS AND SELF SIMILARITY. **Indiana University Mathematics Journal**, [s.l.], v. 30, n. [1], p.713-747, 1981.

IES LM-83-12, Illuminating Engineering Society. **IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)**: SKU: LM-83-12. [s.l]: Illuminating Engineering Society Of North America, 2013. 14 p.

IESNA – Illuminating engineering Society of North America, IES Lighting Handbook, 8ªed. IESNA, Nova Iorque, 1993.

IBRAHIM, Magdy M.; KRAWCZYK, Robert J.. Generating Fractals Based on Spatial Organizations. **Illinois Institute Of Technology**, Chicago, v. [1], n. [1], p.1-9, 2001.

ISSA, Rajaa. **Essential Mathematics**: for computational design. 3. ed. [s.l]: Robert Mcneel & Associates, 2013. 79 p.

JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. **The Adaptive Zone – A Concept for Assessing Glare Throughout Daylit Spaces**. In: Proceedings of Building Simulation, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association. p. 14- 16. Sydney, 2011.

JOYE, Yannick. Cognitive and Evolutionary Speculations for Biomorphic Architecture. **Leonardo**, [s.l.], v. 39, n. 2, p.145-152, abr. 2006. MIT Press - Journals. <http://dx.doi.org/10.1162/leon.2006.39.2.145>.

JOYE, Yannick. Fractal Architecture Could Be Good for You. **Nexus Network Journal**, [s.l.], v. 9, n. 2, p.311-320, out. 2007. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00004-007-0045-y>.

KOLAREVIC, B.. **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing**. [s.l.]: Taylor & Francis Group, 2005. 320 p

LAB Architecture Studio. 2017. Disponível em: <<http://www.labarchitecture.com>>. Acesso em: 13 mar. 2018.

LANGHEIN, Joachim. Proportion and Traditional Architecture. **Proportion And Traditional Architecture**, [s.l.], v. 1, n. 10, p.1-21, 2005.

LIMA, Fábio F.. NOVAS FRONTEIRAS ESPACIAIS: HIBRIDIZAÇÃO ENTRE ARTE E ARQUITETURA DIGITAL. **Revista Estética e Semiótica**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.65-77, 29 nov. 2011. Programa de Pos-Graduacao em Arquitetura e Urbanismo - Univ. de Brasília. <http://dx.doi.org/10.18830/issn2238-362x.v1.n1.2011.04>.

LORENZ, Wolfgang E.. Fractal Geometry of Architecture: Implementation of the Box-Counting Method in a CAD-Software. **Ecaade 27**, Istanbul, p.697-704, set. 2009.

LOVEJOY, S.. Area-Perimeter Relation for Rain and Cloud Areas. **Science**, [s.l.], v. 216, n. 4542, p.185-187, 9 abr. 1982. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.216.4542.185>.

MACHADO, Arlindo. **Máquina e Imaginário: O Desafio das Poéticas Tecnológicas**. 2. ed. São Paulo: Edusp, 1993. 316 p.

MALIK, Richa. INTELLIGENT BUILDING FACADES. **International Journal Of Civil Engineering And Technology (ijciet)**, [s.l.], v. 8, n. 5, p.1340-1346, maio 2017.

MANDELBROT, Benoit B.. **The Fractal Geometry of Nature**. Nova Iorque: W. H. Freeman And Company, 1977. 480 p.

MANDELBROT, Benoit. **Fractals and Chaos: The Mandelbrot Set and Beyond**. [s.l.]: Springer, 2004. 308 p.

MARCUS, Carter; HERNÁN, Díaz Alonso. Emergent Models of Architectural Practice. **Perspecta: Architecture After all**, Cambridge, v. 38, p.57-68, Não é um mês válido! 2006.

MARDALJEVIC, J; HESCHONG, L; LEE, e. Daylight metrics and energy savings. **Lighting Research & Technology**, [s.l.], v. 41, n. 3, p.261-283, set. 2009. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1477153509339703>.

MARDALJEVIC, John. Climate-Based Daylight Modelling And Its Discontents. **Cibse Technical Symposium**, Londres, v. [1], p.1-12, abr. 2015.

MARIANO, Pedro Oscar Pizzetti; PEREIRA, Alice Theresinha Cybis. Desenvolvimento de partidos geométricos para construções verticais utilizando de geometrias complexas, ferramentas paramétricas e generativas. **Blucher Design Proceedings**, Concepcions, Chile, p.290-294, nov. 2017. Editora Blucher. <http://dx.doi.org/10.5151/sigradi2017-046>.

MATOS, M.; MARINOSKI, D. L.; ORDENES, M.; PEREIRA, F. O. R.. Análise de diferentes métodos de avaliação do aproveitamento da luz natural. In: **ENCAC**, 2007.

MCNEIL, A.; LEE, E.s.. A validation of the Radiance three-phase simulation method for modelling annual daylight performance of optically complex fenestration systems. **Journal Of Building Performance Simulation**, [s.l.], v. 6, n. 1, p.24-37, jan. 2013. Informa UK Limited.

MENGES, Achim. Biomimetic design processes in architecture: morphogenetic and evolutionary computational design. **Bioinspiration & Biomimetics**, [s.l.], v. 7, n. 1, p.1-11, 16 fev. 2012. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-3182/7/1/015003>.

MICHAEL Sorkin Studio. 2018. Disponível em: <<http://www.sorkinstudio.com/>>. Acesso em: 12 mar. 2018.

MINUCCI, Ana Maria Sala; LIBRANTZ, André Felipe Henriques. A geometria fractal e suas aplicações em arquitetura e urbanismo. **Exacta**, [s.l.], v. 4, n. , p.1-15, 1 jul. 2006. University Nove de Julho. <http://dx.doi.org/10.5585/exacta.v4iesp.706>.

MITCHELL, William J.. Constructing Complexity. **Computer Aided Architectural Design Futures 2005**, [s.l.], p.41-50, 2005. Springer-Verlag. [http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-3698-1\\_3](http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-3698-1_3).

MONTENEGRO, Gildo A. Geometria descritiva. São Paulo: E. Blucher, 1991. 177 p ISBN (Broch.).

MORSE, D. R. et al. Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod body lengths. **Letters To Nature**, [s.l.], v. 314, p.731-733, mar. 1985.

NABIL, Azza; MARDALJEVIC, John. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 38, n. 7, p.905-913, jul. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.013>.

NUNES, Raquel Soa Rebelo. **Geometria Fractal e Aplicações**. 2006. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Matemática, Matemática Pura, Universidade do Porto, Porto, 2006.

OSAMA, Amal; SHERIF, Lobna; EZZELDIN, Sherif. FRACTAL GEOMETRY IN ARCHITECTURE: FROM FORMATIVE IDEA TO SUPERFICIAL SKIN DESIGN. **Archdesign**, Istanbul, Turkey, v. 14, n. [1], p.39-49, abr. 2014.

OSTWALD, Michael J.. “Fractal Architecture”: Late Twentieth Century Connections Between Architecture and Fractal Geometry. **Nexus Network Journal**, [s.l.], v. 3, n. 1, p.73-84, abr. 2001. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00004-000-0006-1>.

OSTWALD, Michael J.; VAUGHAN, Josephine; TUCKER, Chris. Characteristic Visual Complexity: Fractal Dimensions in the Architecture of Frank Lloyd Wright and Le Corbusier. **Architecture And Mathematics From Antiquity To The Future**, [s.l.], p.339-354, 7 maio 2014. Springer International Publishing. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-00143-2\\_22](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-00143-2_22).

OXMAN, Rivka. Theory and design in the first digital age. **Design Studies**, [s.l.], v. 27, n. 3, p.229-265, maio 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>.

OXMAN, Rivka. 'DIGITAL DESIGN THINKING': IN THE NEW DESIGN IS THE NEW PEDAGOGY. **Caadria 11**, Kumamoto, Japão, v. [1], p.37-46, 2006.

OXMAN, Rivka; HAMMER, Roey; ARI, Shoham Ben. Performative Design in Architecture: Employment of Virtual Prototyping as a Simulation Environment in Design Generation. **Ecaade 25**, Frankfurt, v. [1], n. [1], p.227-234, 2007.

OXMAN, Rivka. Digital architecture as a challenge for design pedagogy: theory, knowledge, models and medium. **Design Studies**, [s.l.], v. 29, n. 2, p.99-120, mar. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2007.12.003>.

PARSONS, Russ. The potential influences of environmental perception on human health. **Journal Of Environmental Psychology**, [s.l.], v. 11, n. 1, p.1-23, mar. 1991. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0272-4944\(05\)80002-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0272-4944(05)80002-7).

PEEBLES, P.j.e.. The fractal galaxy distribution. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, [s.l.], v. 38, n. 1-3, p.273-278, set. 1989. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-2789\(89\)90205-4](http://dx.doi.org/10.1016/0167-2789(89)90205-4).

PENTLAND, Alex P.. Fractal-Based Description of Natural Scenes. **Ieee Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence**, [s.l.], v. -6, n. 6, p.661-674, nov. 1984. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tpami.1984.4767591>

PEREZ, R.; *et al.* Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44, n. 5, p. 271-289. 1990.

PONTES, Bruno Pereira; ALEIXO, Fellipe; MINORA, Leonardo Ataíde. PROCESSO ACADÊMICO SIMPLIFICADO: UMA PROPOSTA DE PROCESSO PARA O CEFET-RN/DATINF. **Holos**,

[s.l.], v. 3, p.74-85, 26 dez. 2007. Instituto Federal de Educacao, Ciencia e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2006.20>.

PRESSMAN, Roger S.. **Engenharia de Software: Uma Abordagem Profissional**. 8. ed. [s.l.]: Amgh, 2016. 989 p.

RABAY, Yara Silva Freire. **Estudo e Aplicação da Geometria Fractal**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Matemática em Rede Nacional, Matemática, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

RAMZY, Nelly Shafik. The Dual Language of Geometry in Gothic Architecture: The Symbolic Message of Euclidian Geometry versus the Visual Dialogue of Fractal Geometry. **Peregrinations: Journal of Medieval Art and Architecture**, Sinai University, v. 5, n. 2, p.135-172, Não é um mês valido! 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. 181-200. Kings Saud University – College of Architecture and Planning. 2010.

REINHART, Christoph F.; MARDALJEVIC, John; ROGERS, Zack. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. **Leukos**, [s.l.], v. 3, n. 1, p.7-31, jul. 2006.

REINHART, Christoph F.; WIENOLD, Jan. The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylight spaces. **Building And Environment**, [s.l.], v. 46, n. 2, p.386-396, fev. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.08.001>.

RHINOCEROS. 2018. Disponível em: <<https://www.rhino3d.com/>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

RIAN, Iasef Md et al. Fractal geometry as the synthesis of Hindu cosmology in Kandariya Mahadev temple, Khajuraho. **Building And Environment**, [s.l.], v. 42, n. 12, p.4093-4107, dez. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.028>.

RIAN, Iasef Md; ASAYAMA, Shuichi. Computational Design of a nature-inspired architectural structure using the concepts of self-similar and random fractals. **Automation In Construction**, [s.l.], v. 66, p.43-58, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.03.010>.

RIBEIRO, Marcelo B.; MIGUELOTE, Alexandre Y.. Fractals and the Distribution of Galaxies. **Brazilian Journal Of Physics**, [s.l.], v. 28, n. 2, p.273-278, jun. 1998. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-97331998000200007>.

ROTHER, Edna Terezinha. Revisao Sistematica X Revisao narrativa. **Acta Paulista de Enfermagem**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 5-15, 2007.

RUMIEZ, Agnieszka. Fractal Architecture. **Architecture And Urban Planning**, [s.l.], v. 8, p.45-49, 19 dez. 2013. Riga Technical University. <http://dx.doi.org/10.7250/aup.2013.019>.

SALA, Nicoletta. Fractal Geometry And Self-Similarity In Architecture: An Overview Across The Centuries. **The International Society Of The Arts, Mathematics, And Ardlitecture**, [s.l.], p.235-244, Não é um mês valido! 2003.

SALA, N.. Fractal geometry and architecture: some interesting connections. **Eco-architecture: Harmonisation between Architecture and Nature**, [s.l.], p.163-173, 7 jun. 2006. WIT Press. <http://dx.doi.org/10.2495/arc060171>.

SALIM, Flora Dilys; BURRY, Jane. Software Openness: Evaluating Parameters of Parametric Modeling Tools to Support Creativity and Multidisciplinary Design Integration. **Computational Science And Its Applications – Iccsa 2010**, [s.l.], p.483-497, 2010. Springer Berlin Heidelberg. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12179-1\\_40](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12179-1_40).

SALINGAROS, N. A. (2003). The sensory value of ornament. *Communication & Cognition*, 36 (3-4), 331-351.

SALINGAROS, Nikos A.; MEHAFFY, Michel W.. **A Theory of Architecture**. [s.l.]: Intercollegiate Studies Institute, 2007. 278 p.

SALINGAROS, Nikos A.. Fractal Art and Architecture Reduce Physiological Stress. **Journal Of Biourbanism**, [s.l.], v. 2, n. 2, p.11-28, 2012.

SAMPER, Albert; HERRERA, Blas. A Study of the Roughness of Gothic Rose Windows. **Nexus Network Journal**, [s.l.], v. 18, n. 2, p.397-417, 8 ago. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00004-015-0264-6>.

SANTOS, Laila Souza. **REQUISITOS DE ILUMINAÇÃO NATURAL NOS SISTEMAS DE AVALIAÇÃO DE EDIFÍCIOS E IMPACTOS ENERGÉTICOS EM EDIFICAÇÕES COMERCIAIS NO BRASIL**. 2012. 120 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

SHEA, Kristina; AISH, Robert; GOURTOVAIA, Marina. Towards integrated performance-driven generative design tools. **Automation In Construction**, [s.l.], v. 14, n. 2, p.253-264, mar. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2004.07.002>.

SHNAPP, Sophie; SITJÀ, Rosa; LAUSTSEN, Jens. WHAT IS A DEEP RENOVATION DEFINITION? **GBPN: DEEP RENOVATION DEFINITION –Technical Report**, [s.l.], v. [1], p.1-24, fev. 2013.

SHI, Xing; YANG, Wenjie. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. **Automation In Construction**, [s.l.], v. 32, p.125-135, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.01.015>.

SPEHAR, Branka et al. Universal aesthetic of fractals. **Computers & Graphics**, [s.l.], v. 27, n. 5, p.813-820, out. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0097-8493\(03\)00154-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0097-8493(03)00154-7).

SEDREZ, Maycon Ricardo; PEREIRA, Alice T. Cybis. CAAD e Criatividade, uma experiência com arquitetura fractal. **Risco**, Eesc-usp, v. 9, n. 1, p.168-179, Não é um mês valido! 2009.

SEDREZ, Maycon Ricardo. **Forma Fractal do Ensino de Projeto Arquitetônico Assistido por Computador**. 2009. 159 f. Dissertação (Mestrado) - PosGraduação em Arquitetura e Urbanismo. Orientadora: Alice T. Cybis Pereira. Em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2009.

SEDREZ, Maycon Ricardo. A CONTRIBUIÇÃO DA ARQUITETURA FRACTAL PARA O ENSINO DE CAAD. **Oculum Ensaios**, Campinas, v. 12, n. 11, p.55-57, jan. 2010.

SEDREZ, Maycon; MENEGHEL, Rafael; CELANI, Gabriela. PROGRAMAÇÃO TEXTUAL E VISUAL PARA A GERAÇÃO DE COMPOSIÇÕES COM GEOMETRIA FRACTAL: UM ESTUDO COMPARATIVO. **Sbqp-tic 2013**, Campinas, São Paulo, v. [1], n. [1], p.301-312, jul. 2013.

SEDREZ, Maycon; MENEGHEL, Rafael de Moraes. PROJETO PARAMÉTRICO COM FRACTAIS NO DETALHAMENTO DE UMA FACHADA. **Parc**, Campinas, v. 4, n. 2, p.19-26, dez. 2013.

SEDREZ, Maycon Ricardo. **Arquitetura e Complexidade: A geometria fractal como sistema generativo**. 2016. 284 f. Tese (Doutorado) - Orientadora: Gabriela Celani, Curso de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Tecnologia e Cidade, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2016.

SEGRE, Roberto; BOAS, Naylor Vilas; LEITÃO, Thiago. O Ministério da Educação e Saúde Pública (1935-1945): as inovações climáticas e tecnológicas. **Docomomo**, Rio de Janeiro, v. 2, p.1-10, 2010.

SILVA, Alberto Manuel Rodrigues da; VIDEIRA, Carlos Alberto Escaleira. **UML - Metodologias e Ferramentas CASE: Linguagem de Modelação UML, Metodologias e Ferramentas CASE na Concepção e Desenvolvimento de Software**. Portugal: Edições Centro Atlântico, 2001. 578 p.

SOUZA, Marcela Tavarez de; SILVA, Michelly Dias da; CARVALHO, Rachel de. Revisão integrativa: o que é e como fazer. **Einstein**, São Paulo, v. 8, n. 1, p.102-106, mar. 2010.

STAVRIC, Milena; MARINA, Ognen. Parametric Modeling for Advanced Architecture. **International Journal Of Applied Mathematics And Informatics**, [s.1], v. 5, n. 1, p.9-16, 2011.

STEFANUTO, Ágata Pâmela Olivari; HENKES, Jairo Afonso. CRITÉRIOS PARA OBTENÇÃO DA CERTIFICAÇÃO LEED: UM

ESTUDO DE CASO NO SUPERMERCADO PÃO DE AÇÚCAR EM INDAIATUBA/SP. **Gest. Sust. Ambient.**, Florianópolis,, v. 1, n. 2, p.282-330, set. 2012.

THE JOURNAL OF THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS. E.u.a. **Aaron Betsky**. 2016. Disponível em: <<http://www.architectmagazine.com/author/aaron-betsky>>. Acesso em: 12 fev. 2018.

TAYLOR, Richard P.; MICOLICH, Adam P.; JONAS, David. The Construction of Jackson Pollock's Fractal Drip Paintings. **Leonardo**, [s.l.], v. 35, n. 2, p.203-207, abr. 2002. MIT Press - Journals. <http://dx.doi.org/10.1162/00240940252940603>.

TAYLOR, R.p.. Reduction of Physiological Stress Using Fractal Art and Architecture. **Leonardo**, [s.l.], v. 39, n. 3, p.245-251, jun. 2006. MIT Press - Journals. <http://dx.doi.org/10.1162/leon.2006.39.3.245>.

TRACADA, Eleni. BIOPHILIC URBAN DEVELOPMENTS FOLLOWING DYNAMIC FLOWS OF TREE-SHAPED ARCHITECTURES. **International Journal Of Heat And Technology**, [s.l.], v. 34, n. 1, p.161-166, 31 jan. 2016. International Information and Engineering Technology Association. <http://dx.doi.org/10.18280/ijht.34s121>.

TRIVEDI, Kirti. Hindu temples: Models of a fractal universe. **The Visual Computer**, [s.l.], v. 5, n. 4, p.243-258, jul. 1989. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02153753>.

STUDIO LIBESKIND. 2018. Disponível em: <<https://libeskind.com/>>. Acesso em: 13 fev. 2018.

VAUGHAN, Josephine; OSTWALD, Michael J.. Using fractal analysis to compare the characteristic complexity of nature and architecture: re-examining the evidence. **Architectural Science Review**, [s.l.], v. 53, n. 3, p.323-332, 1 ago. 2010. Informa UK Limited.

VENTURI, Robert. **Complexity and Contradiction in Architecture**. Nova Iorque: The Museun Of Modern Art Papers On Architecture, 1977. 133 p.

VINE, E. et al. Office worker response to an automated Venetian blind and electric lighting system: a pilot study. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 28, n. 2, p.205-218, out. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-7788\(98\)00023-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-7788(98)00023-1).

WAIHRICH, Lorena P. et al. PESQUISA DE PADRÕES E SUAS APLICAÇÕES EM ARQUITETURA E URBANISMO: ênfase em Geometria Fractal. **Mecânica Computacional**, Buenos Aires, Argentina, v. , n. [1], p.6341-6359, nov. 2010.

WHITTEMORE, Robin; KNAFL, Kathleen. METHODOLOGICAL ISSUES IN NURSING RESEARCH: The integrative review: updated methodology. **Journal Of Advanced Nursing**, [s.l.], v. 52, n. 5, p.546-553, 2005.

WILLIAMS, Kim; OSTWALD, Michael J.. Seed Concepts in Architecture and Mathematics. **Nexus Network Journal**, [s.l.], v. 18, n. 2, p.333-335, 9 maio 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00004-016-0301-0>.

WISE, James A. ROSENBERG, Erika. The Effects of Interior Treatments on Performance Stress in Three Types of Mental Tasks. Technical Report, Space Human Factors Office. **NASA-ARC**, fevereiro de 1986.

ZUHAIB, Sheikh et al. Generic assessment of optimisation methods for performance based design of retrofitted building façades for nearly zero-energy buildings. **10th Economic Forum: ADVANCED BUILDING SKINS 2016**, At Bern, Suíça, v. 10, p.425-434, nov. 2015

6 APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DOS ELEMENTOS DE FACHADA

Figura 141 – Parametros utilizados durante as diferentes etapas do processo

Parâmetros que compõem a montagem do entorno paramétrico.

Aspectos topográficos e dimensionais	PARÂMETROS		
	Dimensão em X (m)	Profundidade Y (m)	
<b>Dimensão da área</b>			
<b>Linha topográfica 01</b>	Altura do ponto A	Altura do ponto B	Altura do ponto C
<b>Linha topográfica 02</b>	Altura do ponto A	Altura do ponto B	Altura do ponto C
<b>Linha topográfica 03</b>	Altura do ponto A	Altura do ponto B	Altura do ponto C
<b>Visualização das curvas de nível</b>	Altura da curva	Visualização da curva	
<b>Infraestrutura</b>			
<b>Distancias das ruas</b>	Larguras Ruas X	Larguras Ruas Y	
<b>Meio fio</b>	Altura em relação a rua		
<b>Largura do passeio</b>	Largura do passeio X	Largura do passeio Y	
<b>Ilustração infra.</b>	Cor da rua	Cor dos prédios	Cor dos terreno
<b>Orientação</b>	Posicionamento do norte		
<b>Número de lotes</b>	Número em X	Número em Y	
<b>Escolha do terreno</b>	Escolha na quadra Nº5		

Dimensões e topografia no primeiro teste do processo.

Topografia e Dimensões	Altura p1	Altura p1	Altura p1	Dist. X	Dist. Y	Tamanho das quadras
Tamanho das quadras	X	X	X	301	451	86 x 166,29
Linha topográfica 01	0	0	0	X	X	
Linha topográfica 02	0	0	0	X	X	
Linha topográfica 03	0	0	0	X	X	

Dimensões e topografia no segundo teste do processo.

Topografia e Dimensões	Altura p1	Altura p1	Altura p1	Dist. X	Dist. Y	Tamanho das quadras
Tamanho das quadras	X	X	X	301	451	86 x 166,29
Linha topográfica 01	50	10	30	X	X	
Linha topográfica 02	10	20	30	X	X	
Linha topográfica 03	20	10	40	X	X	

Parâmetros da infraestrutura (ruas, passeios e meio fio), nas duas fases do processo.

Parâmetros	Rua eixo X	Rua eixo y	H meio fio	L. Passeio X	L. Passeio y
Valores	14	8	0.15	6	2

Relação entre taxa de ocupação e escala ocupada pelo pavimento térreo da construção.

Taxa de ocupação (%)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Escala	1.00	0.95	0.895	0.835	0.775	0.71	0.633	0.55	0.45	0.317

Relação entre taxa de ocupação e escala ocupada pelo pavimento térreo da construção mais utilizados.

Taxa de ocupação (%)	100	90,22	81	72,25	64	56,25	49	36
Escala	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.60

Parâmetros da infraestrutura (norte e número de lotes por quadra).

Parâmetros	Quadra 1	Quadra 2	Quadra 3	Quadra 4	Quadra 5	Quadra 6	Quadra 7	Quadra 8	Quadra 9
Lotes direção x	3	7	6	3	6	2	4	10	5
Lotes direção Y	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Norte (°)	180								

Parâmetros quadra 1, segundo sequência de testes.

Q 1	1º Pav.	Esc. em relação ao terreno	Esc. 1º pav.	Alt.	Lajes.
1	18	0.85	0.84	3.5	12
2	10	0.85	0.78	4	5
3	13	0.80	0.56	3.5	5
4	10	0.85	1.00	4	6
5	8	0.60	1.00	3.5	20
6	6	0.90	0.90	3.5	10

Parâmetros quadra 2, segundo sequência de testes.

Q 2	1º Pav.	Esc. em relação ao terreno	Esc. 1º pav.	Alt.	Lajes.
1	12	0.85	1.00	4	5
2	7	1.00	1.00	3.5	6
3	10	0.90	1.00	4	6
4	10	0.85	0.90	3.5	22
5	9	0.85	1.00	3.5	6
6	6	0.85	1.00	4.0	8
7	7	1.00	0.70	3.5	5
8	5	0.85	0.84	3.5	8
9	7	0.90	1.00	3.5	7
10	8	0.85	1.00	3.5	9
11	8	0.84	1.00	3.5	17
12	9	0.60	0.10	3.5	2
13	8	0.90	1.00	4	3
14	5	0.95	0.95	3.5	12

Parâmetros quadra 5, segundo sequência de testes.

Q 5	1º Pav.	Esc. em relação ao terreno	Esc. 1º pav.	Alt.	Lajes.
1	8	1.00	0.90	3.5	8
2	7	0.90	1.00	3.5	7
3	5	0.70	1.00	3	31
4	5	0.85	0.90	3.5	4
5	7	0.85	0.85	3.5	8
6	6	1.00	1.00	3.5	14
7	X	X	X	X	X
8	6	0.70	1.00	3.5	10
9	5	0.85	0.85	4	9
10	6	0.85	0.85	3.5	4
11	4	0.85	0.85	3.5	3
12	4	0.95	1.00	3.5	18

Parâmetros utilizados no desenvolvimento da construção

Parâmetros	Largura da testada	Comprimento (profundidade)	Altura dos pavimentos	Espessura da laje	Nº lajes	Profundidade interna	Divisórias internas
Valor	9	14	3.6	0.20	6	6	X

Parâmetros quadra 3, segundo sequência de testes.

Q 3	1º Pav.	Esc. em relação ao terreno	Esc. 1º pav.	Alt.	Lajes.
1	8	0.85	0.84	3.5	13
2	6	0.70	1.00	4	5
3	6	0.70	0.95	3.0	12
4	5	0.90	1.00	3.5	22
5	10	0.80	1.00	3.5	6
6	7	0.95	1.00	3.5	5
7	11	0.95	1.00	3.5	19
8	12	0.90	1.00	3.5	5
9	14	0.90	1.00	3.5	4
10	7	0.95	0.84	3.5	12
11	14	0.90	0.90	3.5	15
12	9	0.85	0.85	4	12

Parâmetros quadra 4, segundo sequência de testes.

Q 4	1º Pav.	Esc. em relação ao terreno	Esc. 1º pav.	Alt.	Lajes.
1	17	0.90	0.60	4	1
2	9	0.95	0.60	4	15
3	9	1.00	1.00	3.5	15
4	6	0.85	0.90	5	10
5	6	0.85	0.84	3.5	17
6	8	0.85	0.70	3.5	10

Parâmetros quadra 6, segundo sequência de testes.

Q 6	1º Pav.	Esc. em relação ao terreno	Esc. 1º pav.	Alt.	Lajes.
1	8	0.85	1.00	3.5	12
2	8	0.80	0.50	3	14
3	12	0.90	0.70	4	18
4	7	0.85	0.90	3	5

Parâmetros quadra 7, segundo sequência de testes.

Q 7	1º Pav.	Esc. em relação ao terreno	Esc. 1º pav.	Alt.	Lajes.
1	7	0.90	1.00	3.4	10
2	10	0.90	1.00	4	4
3	5	0.90	0.90	3.5	6
4	10	0.90	1.00	3.5	12
5	8	0.70	1.00	3.5	12
6	8	0.80	0.90	4	9
7	6	0.95	0.90	3.5	5
8	7	0.70	1.00	3.2	19

Parâmetros quadra 8, segundo sequência de testes.

Q 8	1º Pav.	Esc. em relação ao terreno	Esc. 1º pav.	Alt.	Lajes.
1	6	0.85	1.00	3.5	5
2	8	0.85	0.85	3.5	7
3	6	0.85	0.85	3.5	12
4	8	0.90	1.00	3.5	4
5	5	0.85	1.00	5	4
6	12	0.90	1.00	3.5	4
7	9	0.70	1.00	3.5	3
8	4	0.85	1.00	3.5	5
9	6	1.00	0.70	3.5	3
10	4	0.85	1.00	3.5	2
11	7	1.00	0.70	3.5	19
12	6	0.80	1.00	4	6
13	13	0.90	1.00	3.5	4
14	5	0.85	1.00	4	3
15	3	0.90	1.00	3.5	5
16	5	0.80	1.00	3.5	17
17	3	0.95	0.70	3.5	2
18	6	0.85	1.00	3.5	6
19	5	0.85	0.85	5	3
20	5	0.85	1.00	3.5	15

Parâmetros quadra 9, segundo sequência de testes.

Q 9	1º Pav.	Esc. em relação ao terreno	Esc. 1º pav.	Alt.	Lajes.
1	6	0.95	0.85	3.5	4
2	6	0.95	0.50	5	4
3	7	1.00	0.85	3.5	10
4	7	1.00	0.85	3.5	4
5	7	1.00	1.00	3.5	5
6	6	0.90	0.85	3.5	9
7	3	0.85	0.85	3.5	9
8	3	0.70	1.00	3.5	19
9	4	0.90	1.00	3.5	10
10	10	0.85	0.85	4	9

Parâmetros quadra 1, primeiros testes.

Q 1	1º Pav.	Esc. em relação ao terreno	Esc. 1º pav.	Alt.	Lajes.
1	6	0.85	0.84	3.5	4
2	6	0.85	0.78	4	5
3	8	0.80	0.56	3.5	5
4	10	0.85	1.00	4	6
5	4	0.60	1.00	3.5	9
6	5	0.90	0.90	3.5	6

Parâmetros quadra 2, primeiros testes.

Q 2	1º Pav.	Esc. em relação ao terreno	Esc. 1º pav.	Alt.	Lajes.
1	8	0.85	1.00	4	5
2	7	0.60	1.00	3.5	4
3	4	0.90	1.00	4	6
4	10	0.85	0.90	3.5	11
5	4	0.85	1.00	3.5	6
6	3	0.85	1.00	4.0	5
7	4	1.00	0.70	3.5	5
8	5	0.85	0.84	3.5	3
9	3	0.90	1.00	3.5	7
10	8	0.85	1.00	3.5	5
11	5	0.85	1.00	3.5	9
12	9	0.60	0.10	3.5	2
13	8	0.90	1.00	4	3
14	3	0.95	0.95	3.5	2

Parâmetros quadra 3, primeiros testes.

Q 3	1º Pav.	Esc. em relação ao terreno	Esc. 1º pav.	Alt.	Lajes.
1	8	0.85	0.84	3.5	5
2	6	0.70	1.00	4	5
3	6	0.70	0.95	3.0	12
4	5	0.90	1.00	3.5	4
5	7	0.80	1.00	3.5	6
6	7	0.95	1.00	3.5	5
7	8	0.95	1.00	3.5	9
8	3	1.00	1.00	3.5	5
9	8	0.90	1.00	3.5	4
10	5	1.00	0.84	3.5	9
11	6	0.90	0.90	3.5	3
12	5	0.85	0.85	4	9

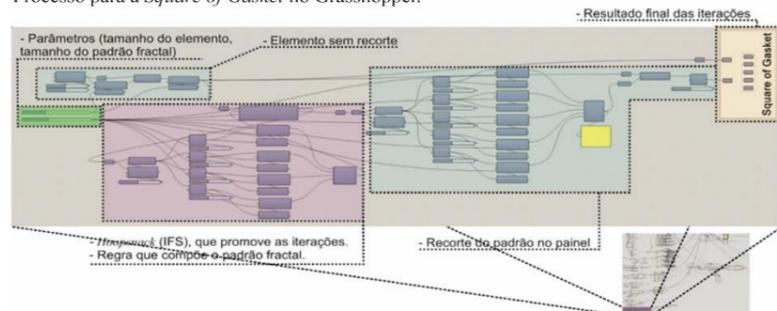
Parâmetros quadra 4, primeiros testes.

Q 4	1º Pav.	Esc. em relação ao terreno	Esc. 1º pav.	Alt.	Lajes.
1	17	1.00	0.60	4	1
2	5	1.00	0.60	4	10
3	7	1.00	1.00	3.5	10
4	3	0.85	0.90	5	10
5	6	0.85	0.84	3.5	8
6	7	0.85	0.70	3.5	4

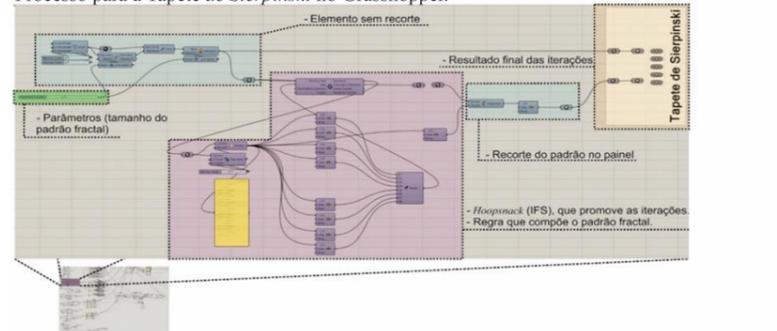
Parâmetros quadra 5, primeiros testes.

Q 5	1º Pav.	Esc. em relação ao terreno	Esc. 1º pav.	Alt.	Lajes.
1	8	1.00	0.90	3.5	8
2	9	0.90	1.00	3.5	7
3	5	0.70	1.00	5	10
4	5	0.85	0.90	3.5	4
5	7	0.85	0.85	3.5	8
6	6	1.00	1.00	3.5	4
7	X	X	X	X	X
8	6	0.70	1.00	3.5	10
9	5	0.85	0.85	4	9

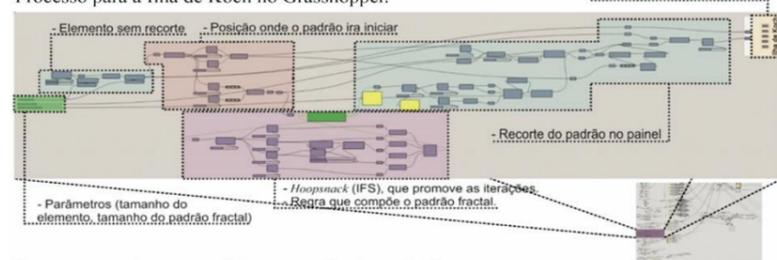
Figura 142 – Diferentes etapas que compõem a programação visual. Processo para a *Square of Gasket* no Grasshopper.



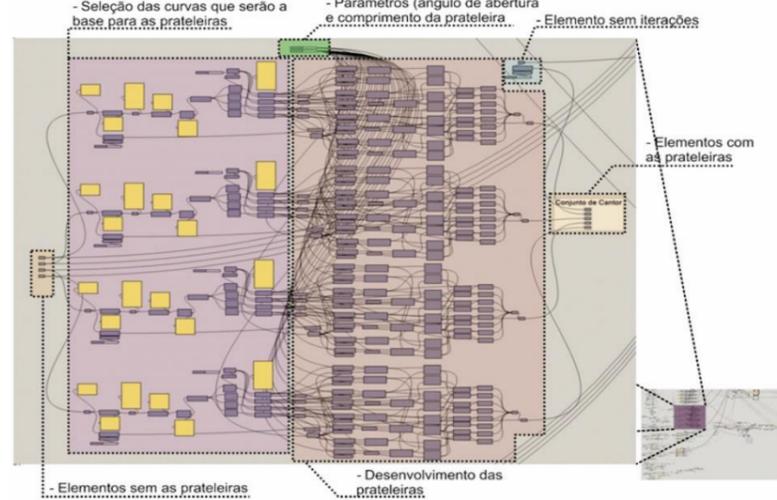
Processo para a Tapete de *Sierpinski* no Grasshopper.



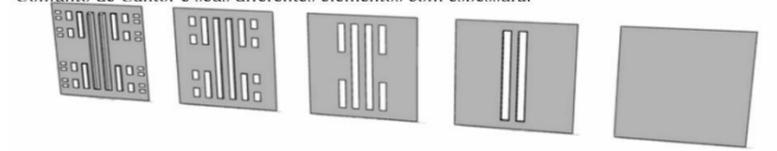
Processo para a Ilha de Koch no Grasshopper.



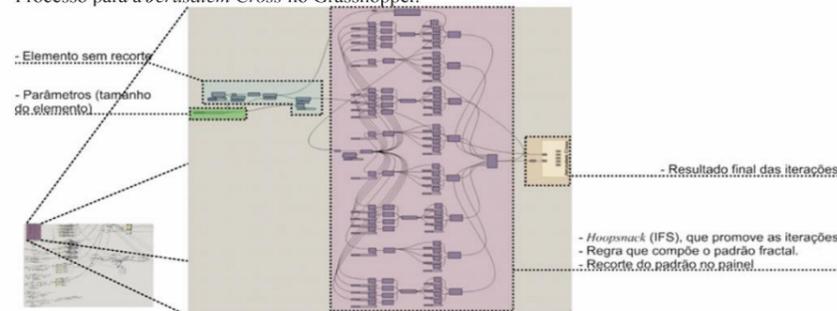
Processo que cria as prateleiras para o Conjunto de Cantor.



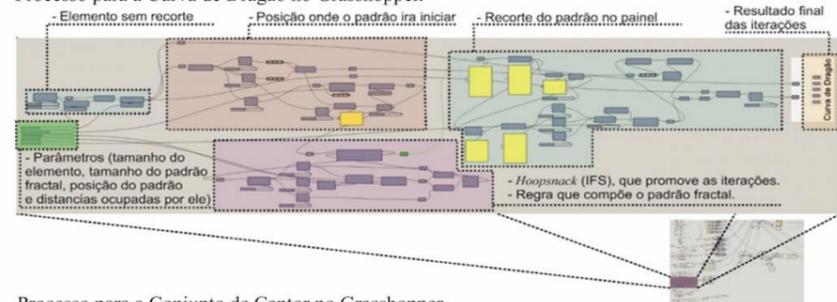
Conjunto de Cantor e seus diferentes elementos com espessura.



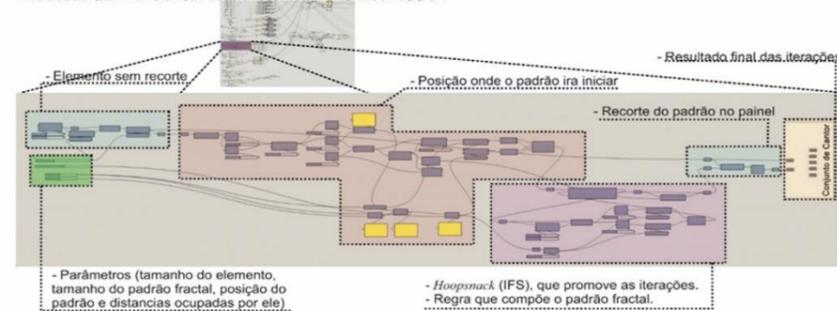
Processo para a *Jerusalém Cross* no Grasshopper.



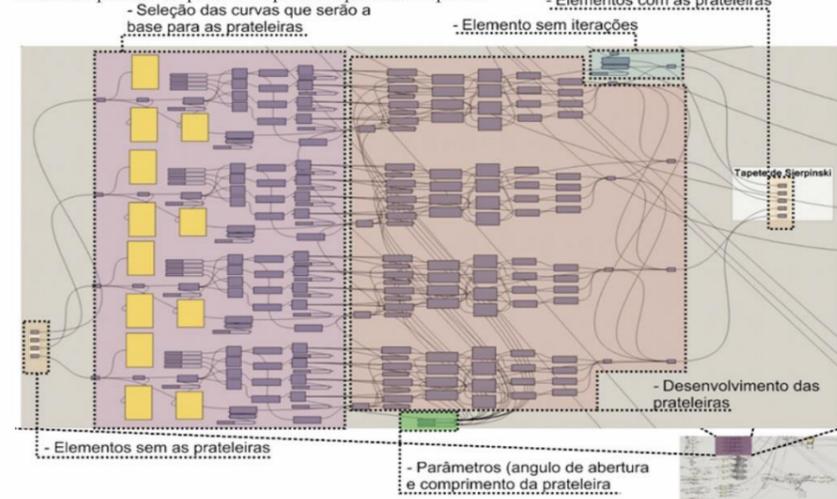
Processo para a Curva de Dragão no Grasshopper.



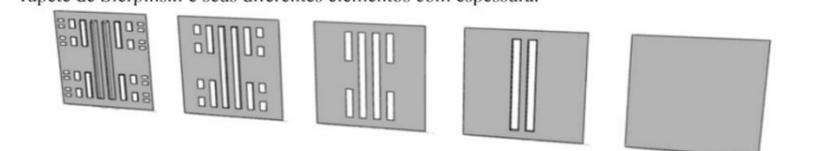
Processo para a Conjunto de Cantor no Grasshopper.



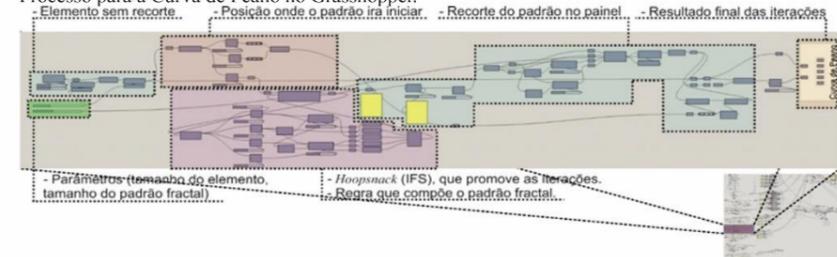
Processo que cria as prateleiras para o Tapete de Sierpinski.



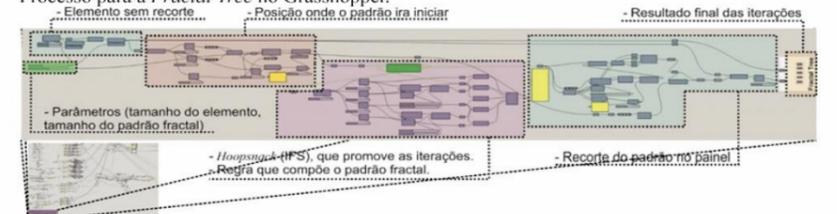
Tapete de Sierpinski e seus diferentes elementos com espessura.



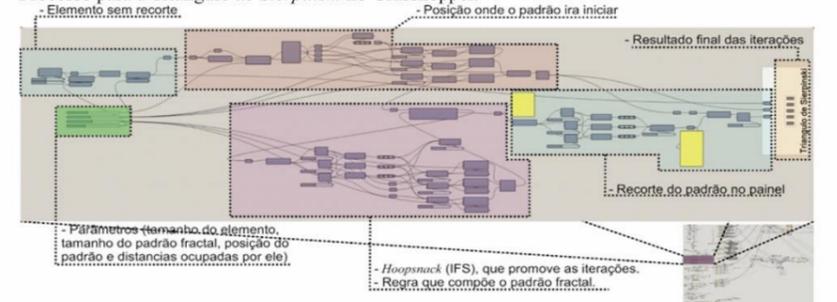
Processo para a Curva de Peano no Grasshopper.



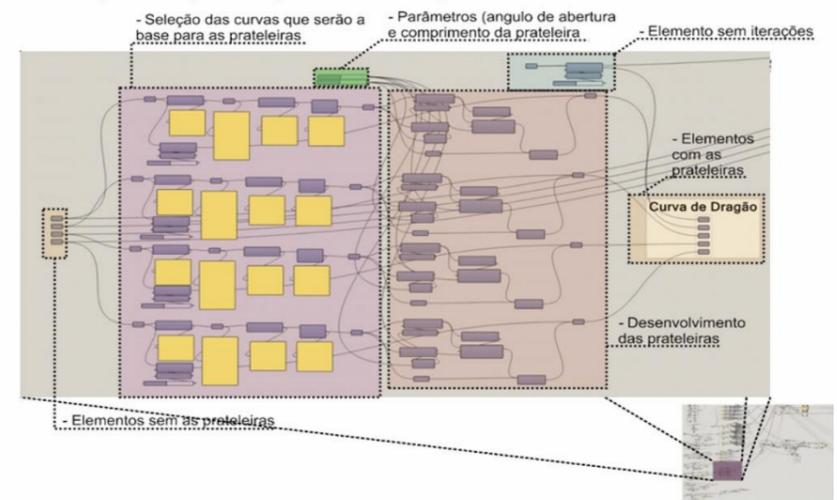
Processo para a *Fractal Tree* no Grasshopper.



Processo para a Triângulo de *Sierpinski* no Grasshopper.



Processo que cria as prateleiras para o Curva de Dragão.



Curva de Dragão e seus diferentes elementos com espessura.

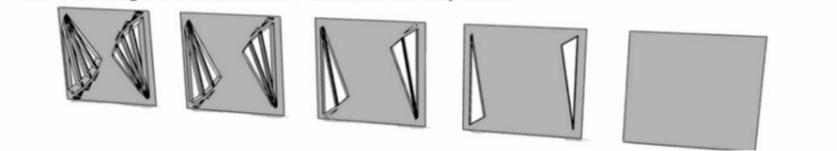
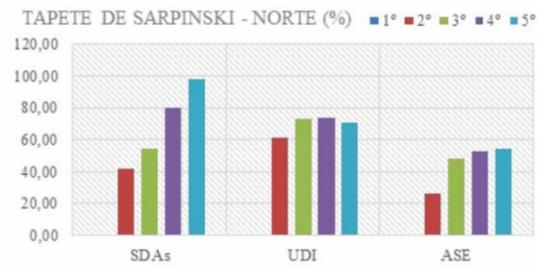
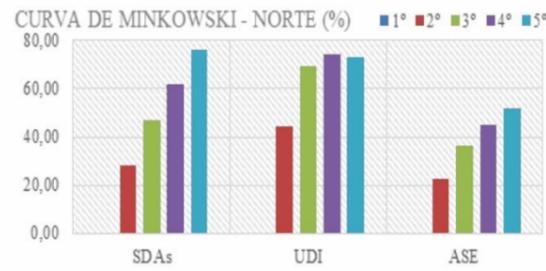


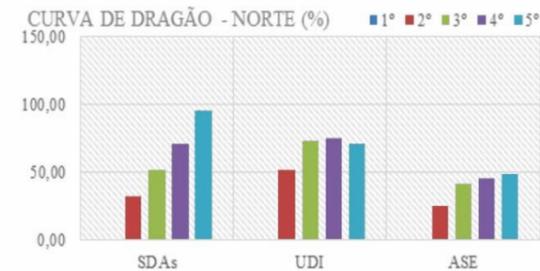
Figura 143 – Gráficos com os resultados das diferentes simulações dinâmicas feitas na pesquisa I. Resultados para o tapete de Sierpinski com 5 iterações para a fachada Norte



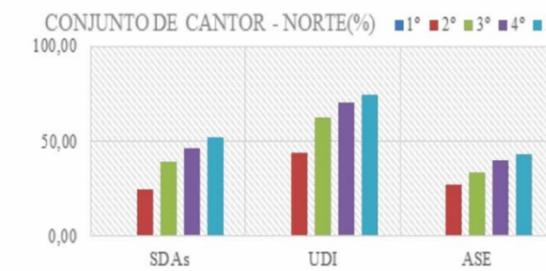
Resultados para o tapete de Curva de Minkowski com 5 iterações para a fachada Norte



Resultados para o tapete de Curva de Dragão com 5 iterações para a fachada Norte



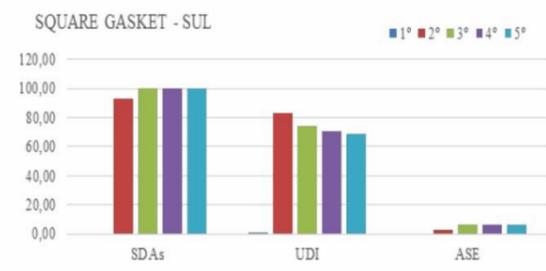
Resultados para o tapete de Conjunto de Cantor com 5 iterações para a fachada Norte



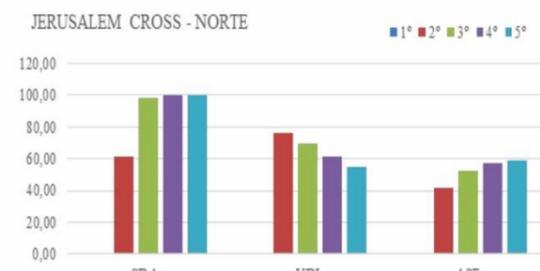
Resultados para o Square Gasket com 5 iterações para a fachada Norte



Resultados para o tapete de Square Gasket com 5 iterações para a fachada Sul



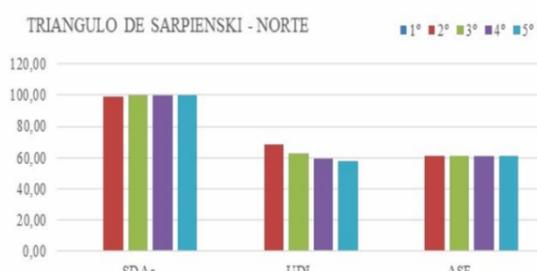
Resultados para o tapete de Jerusalém Cross com 5 iterações para a fachada Norte



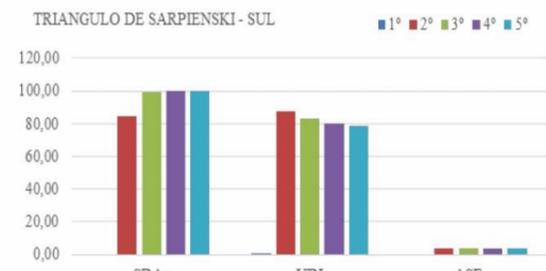
Resultados para o tapete de Jerusalém Cross com 5 iterações para a fachada Sul



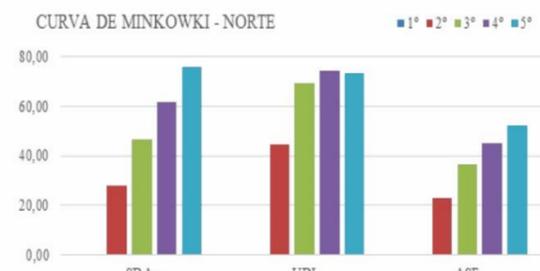
Resultados para o Triângulo de Sierpinski com 5 iterações para a fachada Norte



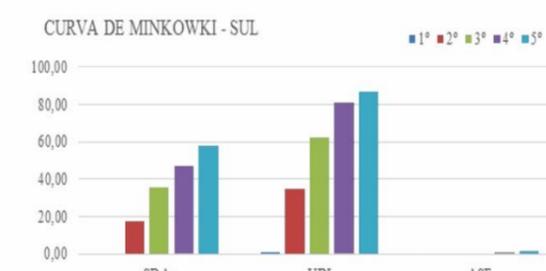
Resultados para o tapete de Triângulo de Sierpinski com 5 iterações para a fachada Sul



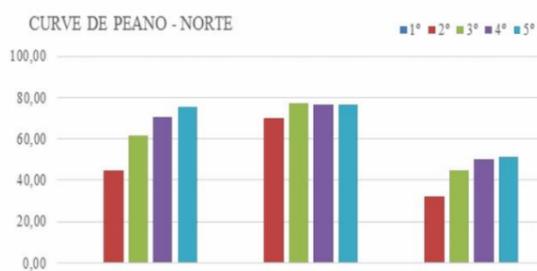
Resultados para o tapete de curva de Minkowski com 5 iterações para a fachada Norte



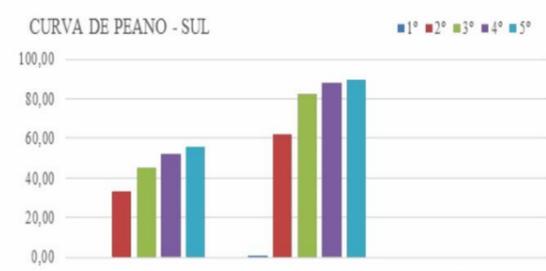
Resultados para o tapete de Curva de Minkowki com 5 iterações para a fachada Sul



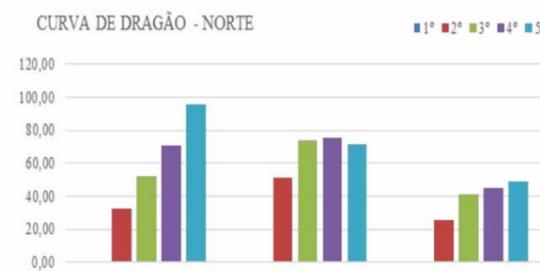
Resultados para o Curva de Peano com 5 iterações para a fachada Norte



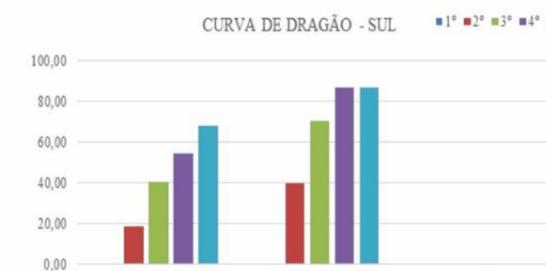
Resultados para o Curva de Peano Sierpinski com 5 iterações para a fachada Sul



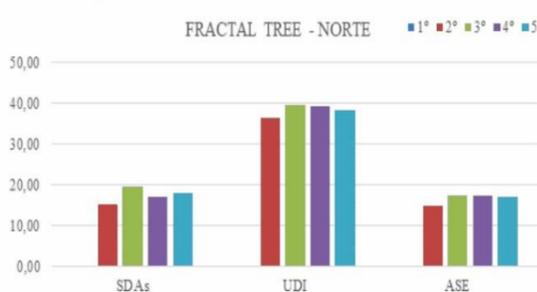
Resultados para o Curva de Dragão com 5 iterações para a fachada Norte



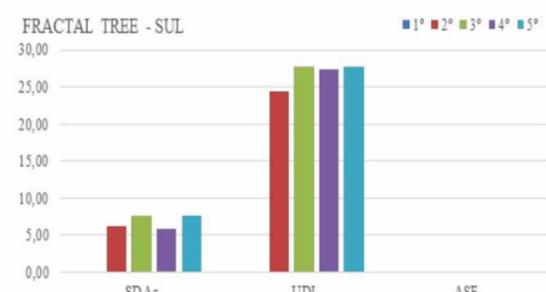
Resultados para o tapete de Curva de Dragão com 5 iterações para a fachada Sul



Resultados para o Fractal Tree com 5 iterações para a fachada Norte



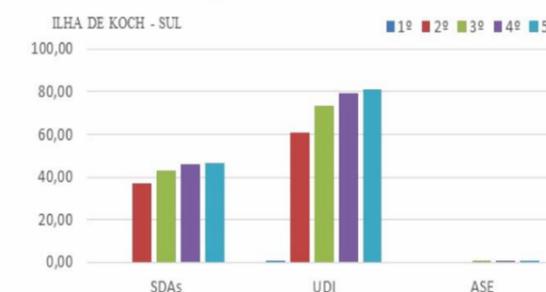
Resultados para o Fractal Tree com 5 iterações para a fachada Sul



Resultados para o Ilha de Koch com 5 iterações para a fachada Norte



Resultados para o tapete de Ilha de Koch com 5 iterações para a fachada Sul



Fonte: O autor

Figura 144 – Gráficos com os resultados das diferentes simulações dinâmicas feitas na pesquisa II.

Gráfico geral para somente uma iteração (1°) e orientação (Norte).

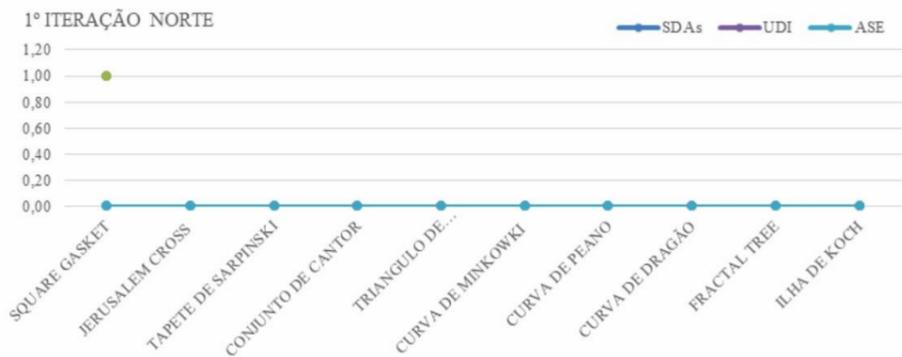


Gráfico geral para somente uma iteração (1°) e orientação (Sul).

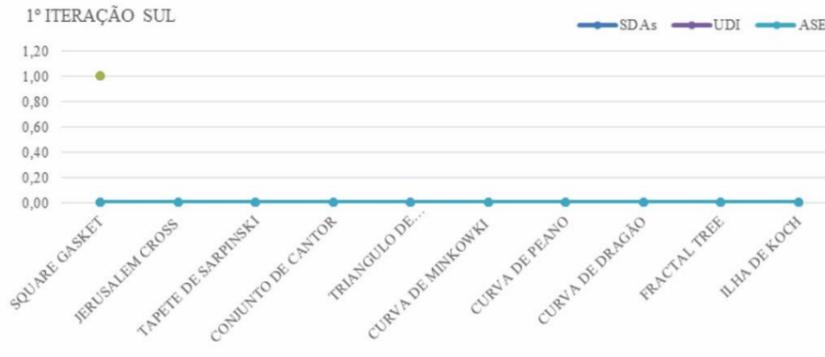


Gráfico para somente uma iteração (3°) e orientação (Norte).

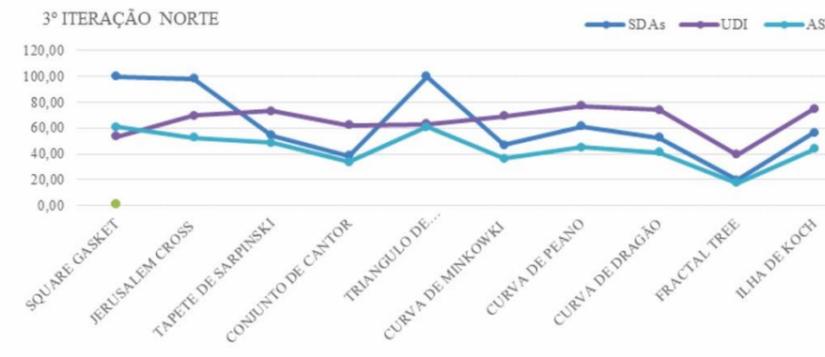


Gráfico para somente uma iteração (3°) e orientação (Sul).

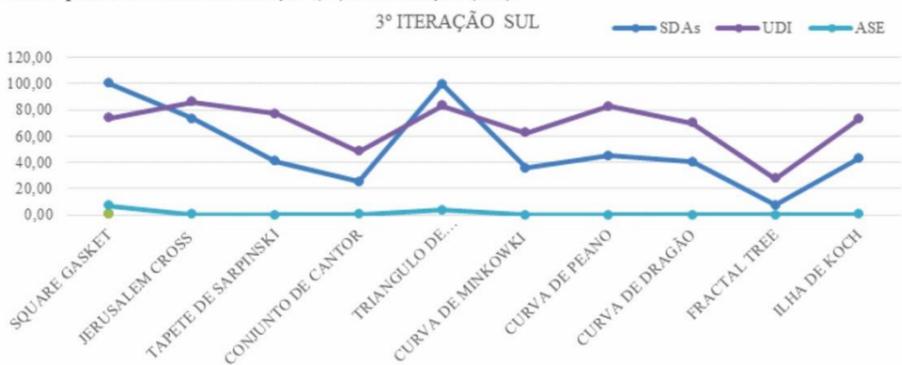


Gráfico geral para somente uma iteração (4°) e orientação (Norte).



Gráfico para somente uma iteração (4°) e orientação (Sul).

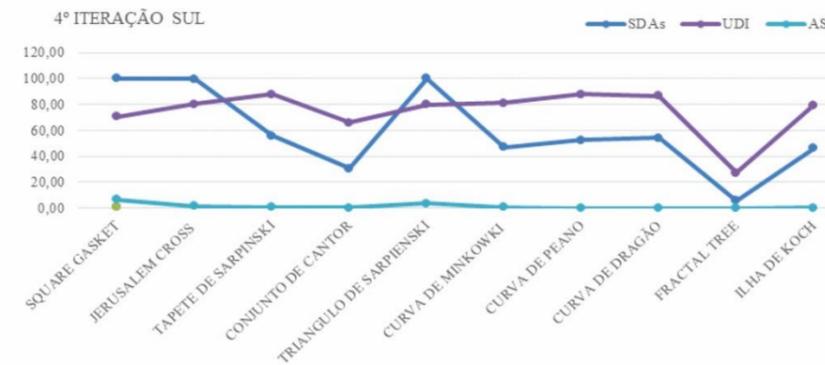


Gráfico para somente uma iteração (5°) e orientação (Norte).

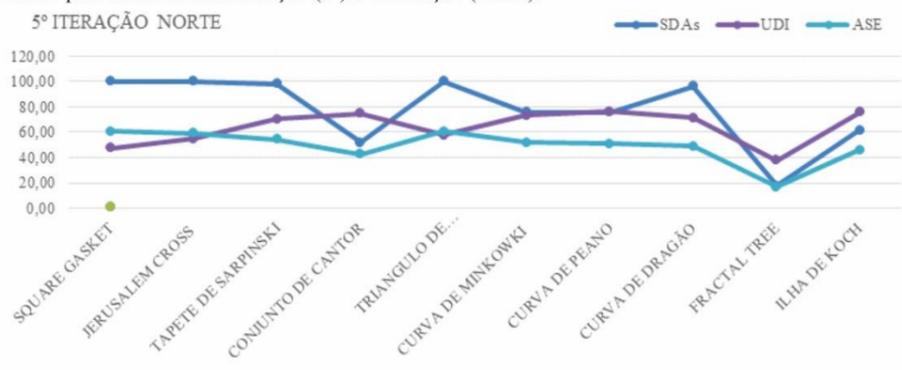


Gráfico geral para somente uma iteração (5°) e orientação (Sul).

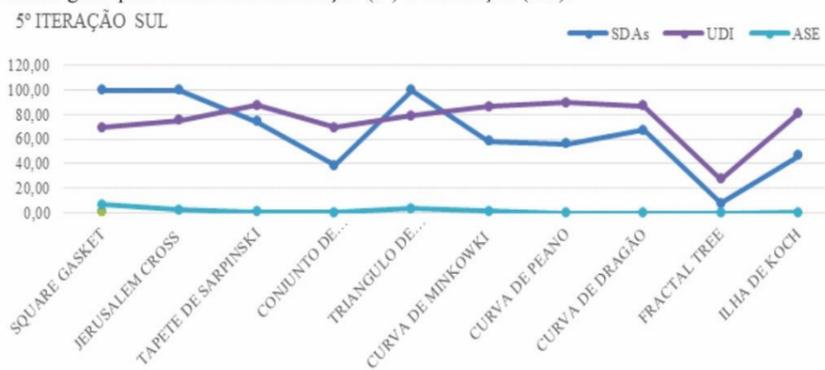


Gráfico com resultados gerais e para diferentes iterações (SDA) para a orientação Norte.

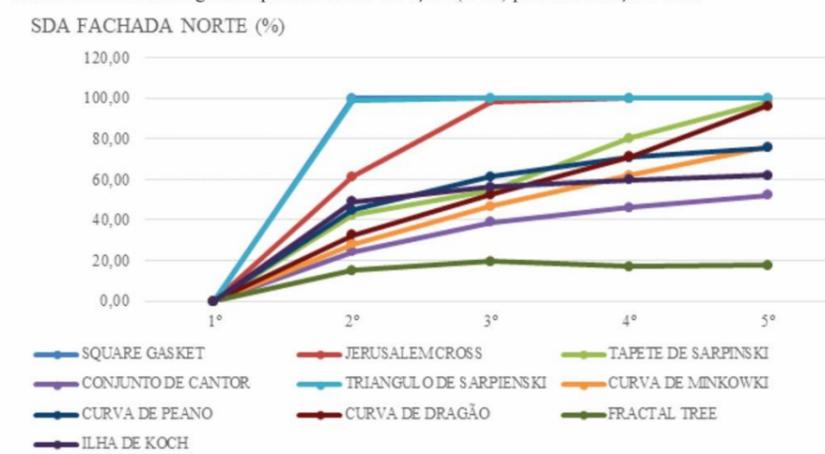


Gráfico com resultados gerais e para diferentes iterações (ASE) para a orientação Norte.

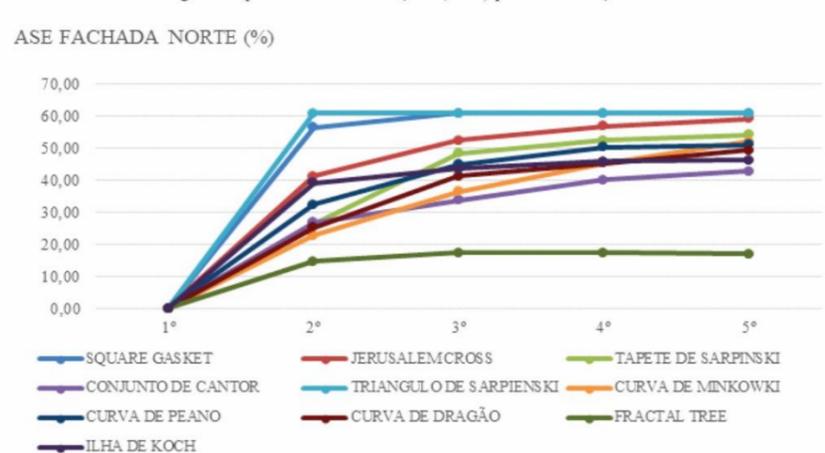
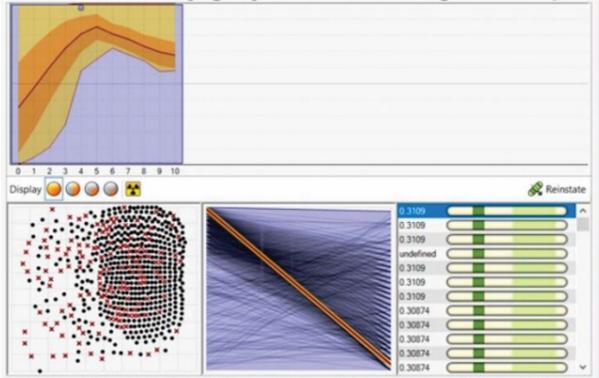
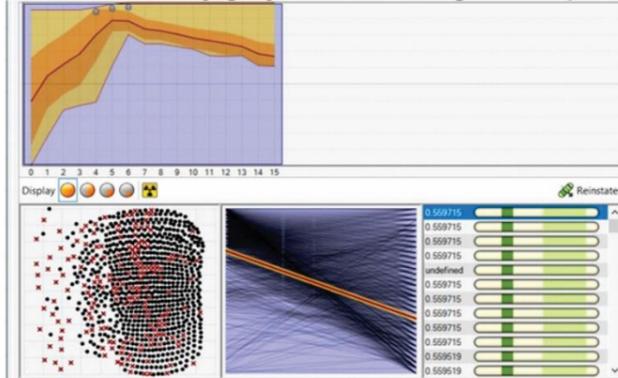


Figura 145 – Resultado do Galápagos para os diferentes tipos de fractais e iterações.

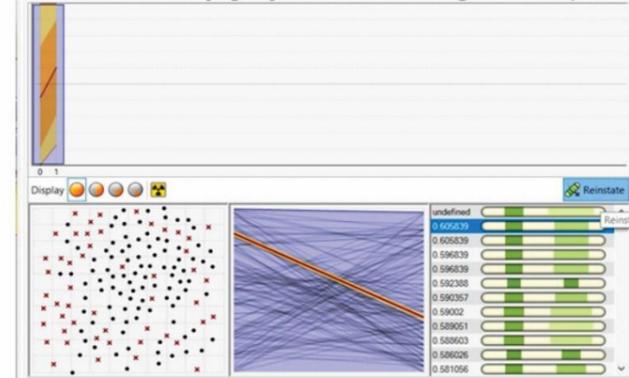
Resultado do Galápagos para a curva de dragão 1º iteração.



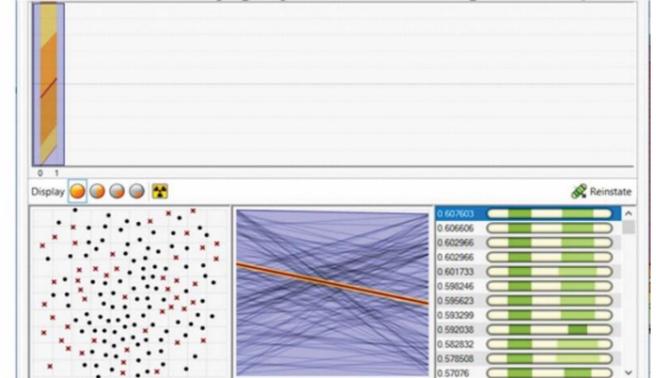
Resultado do Galápagos para a curva de dragão 2º iteração.



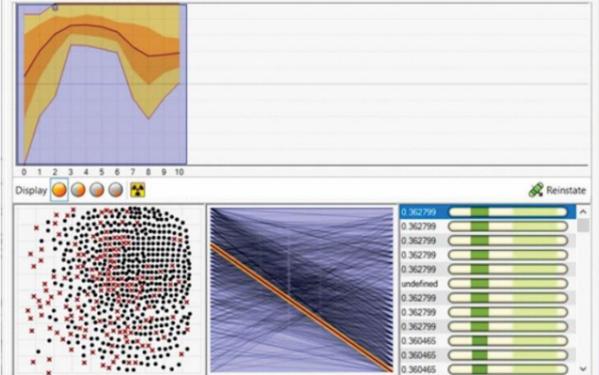
Resultado do Galápagos para a curva de dragão 3º iteração.



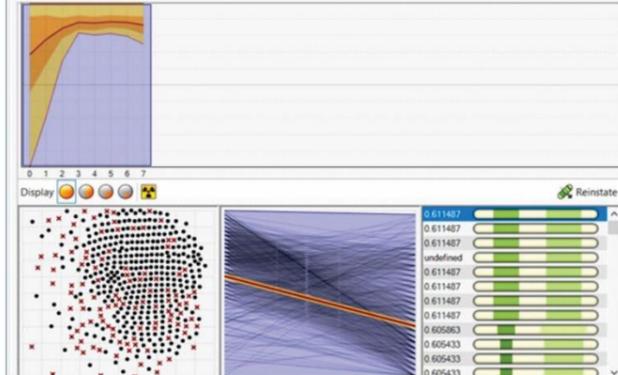
Resultado do Galápagos para a curva de dragão 4º iteração.



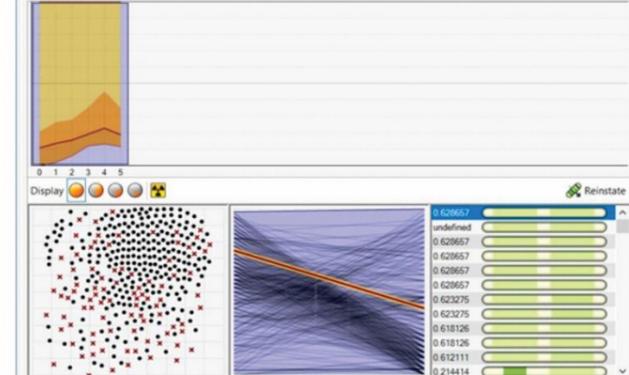
Resultado do Galápagos para a curva de Minkowski 1º iteração.



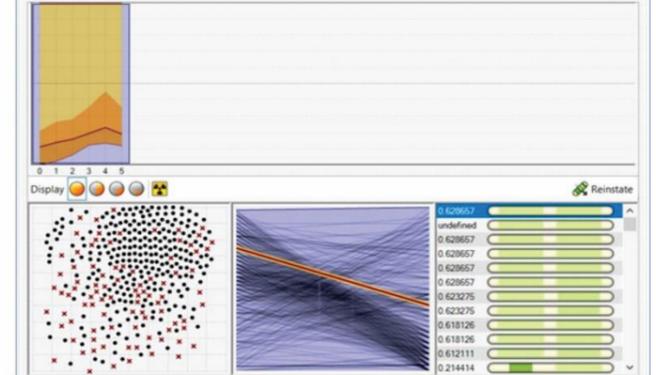
Resultado do Galápagos para a curva de Minkowski 2º iteração.



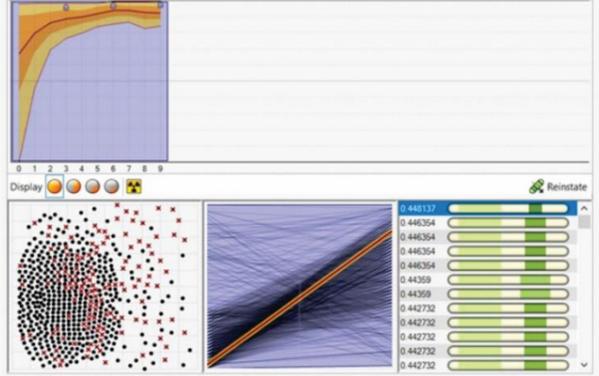
Resultado do Galápagos para a curva de Minkowski 3 iteração.



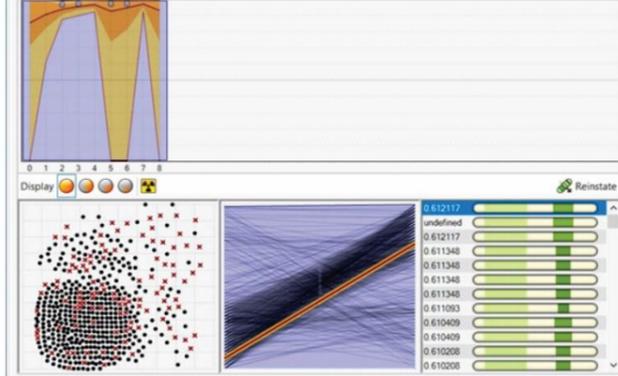
Resultado do Galápagos para a curva de Minkowski 4º iteração.



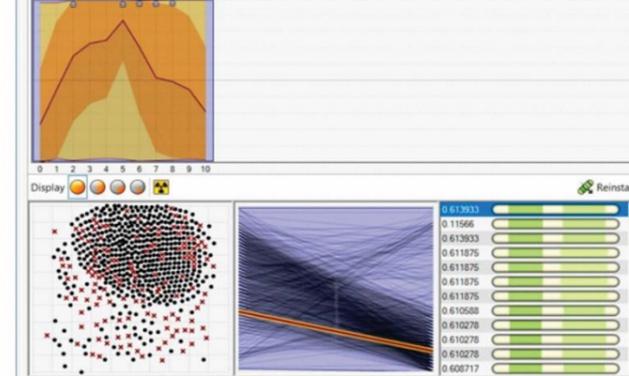
Resultado do Galápagos para o conjunto de cantor 1º iteração.



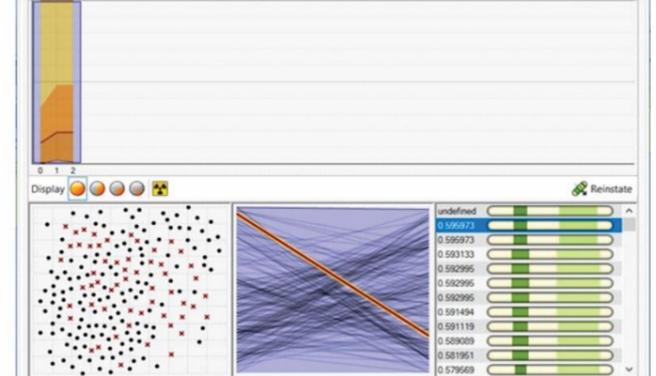
Resultado do Galápagos para o conjunto de cantor 2º iteração.



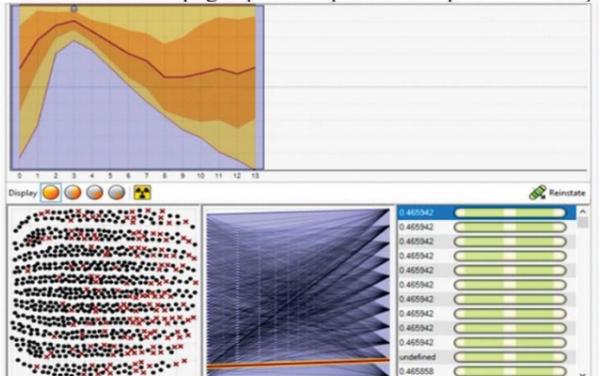
Resultado do Galápagos para o conjunto de cantor 3º iteração.



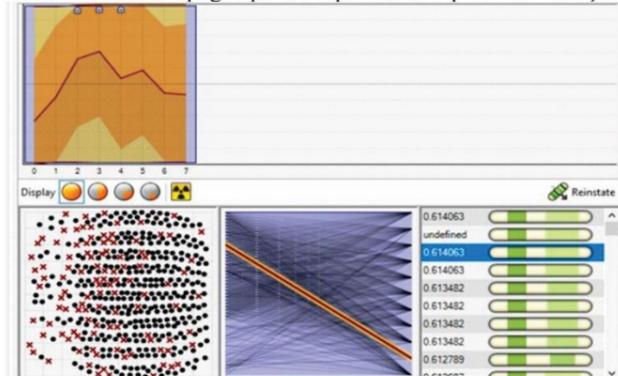
Resultado do Galápagos para o conjunto de cantor 4º iteração.



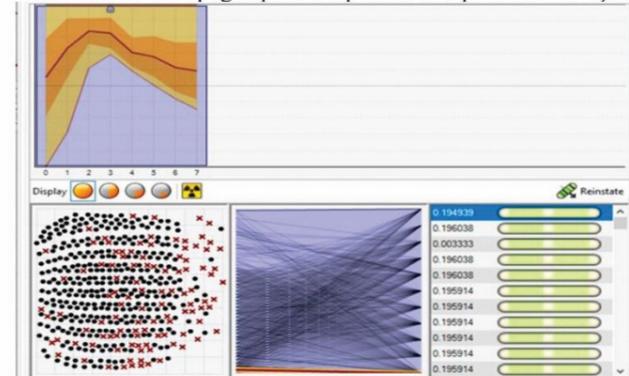
Resultado do Galápagos para o tapete de Sierpinski 1º iteração.



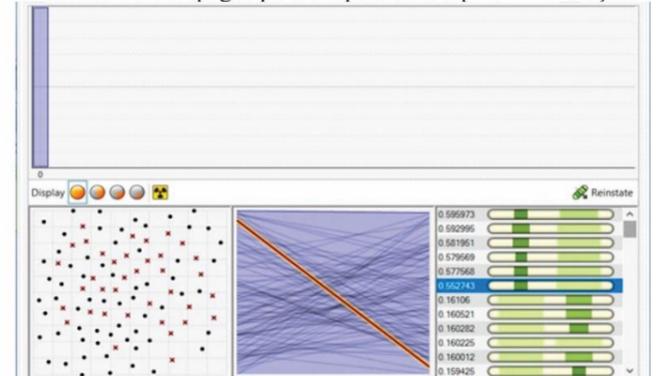
Resultado do Galápagos para o tapete de Sierpinski 2º iteração.



Resultado do Galápagos para o tapete de Sierpinski 3º iteração.



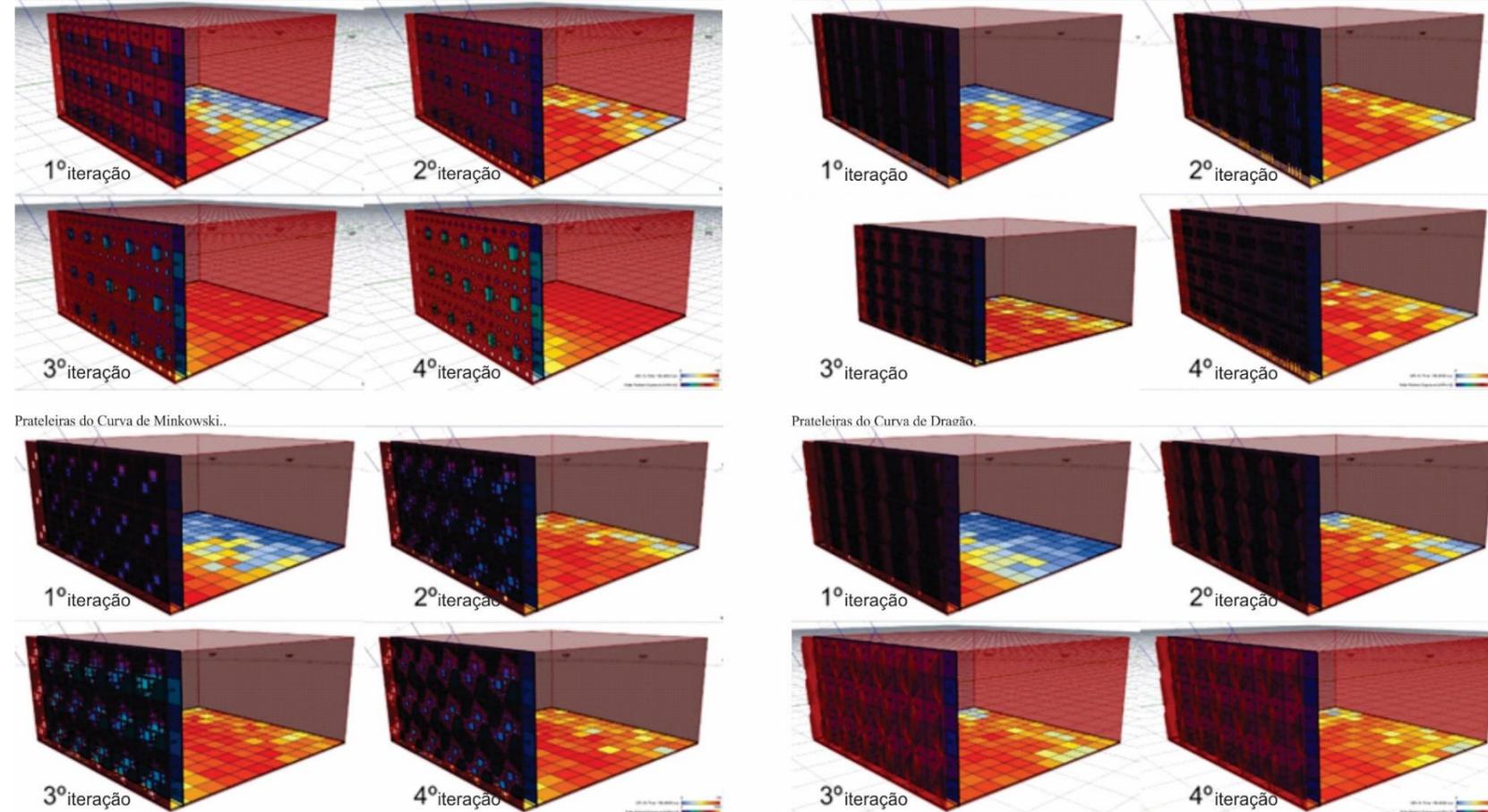
Resultado do Galápagos para o tapete de Sierpinski 4º iteração.



Fonte: O autor.

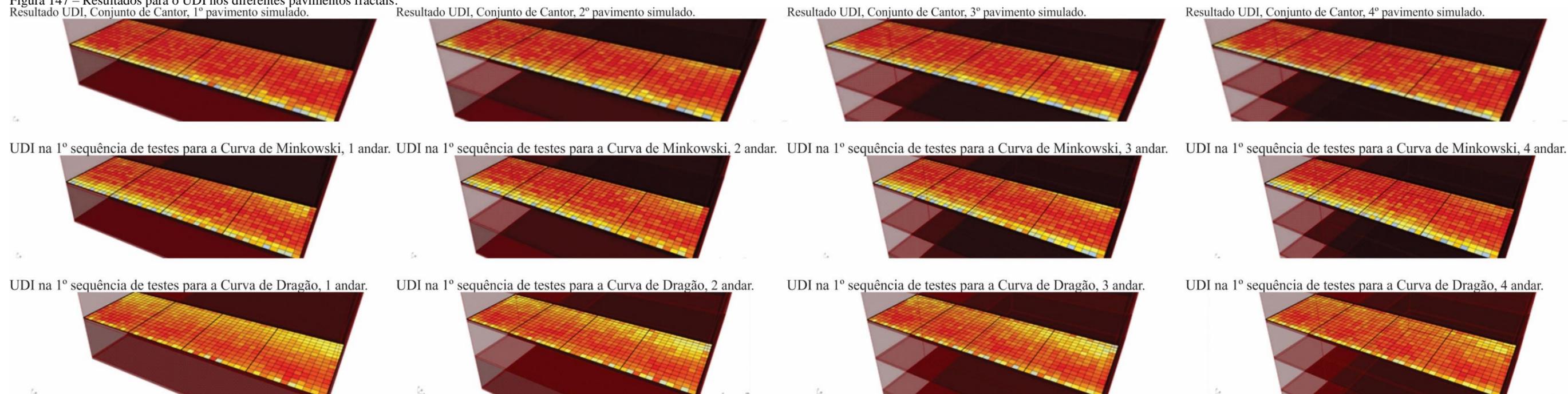
7 APÊNDICE B – ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES

Figura 146 – Resultados das adições de elementos (espessura) sombreadores nos painéis fractais.



Fonte: O autor.

Figura 147 – Resultados para o UDI nos diferentes pavimentos fractais.

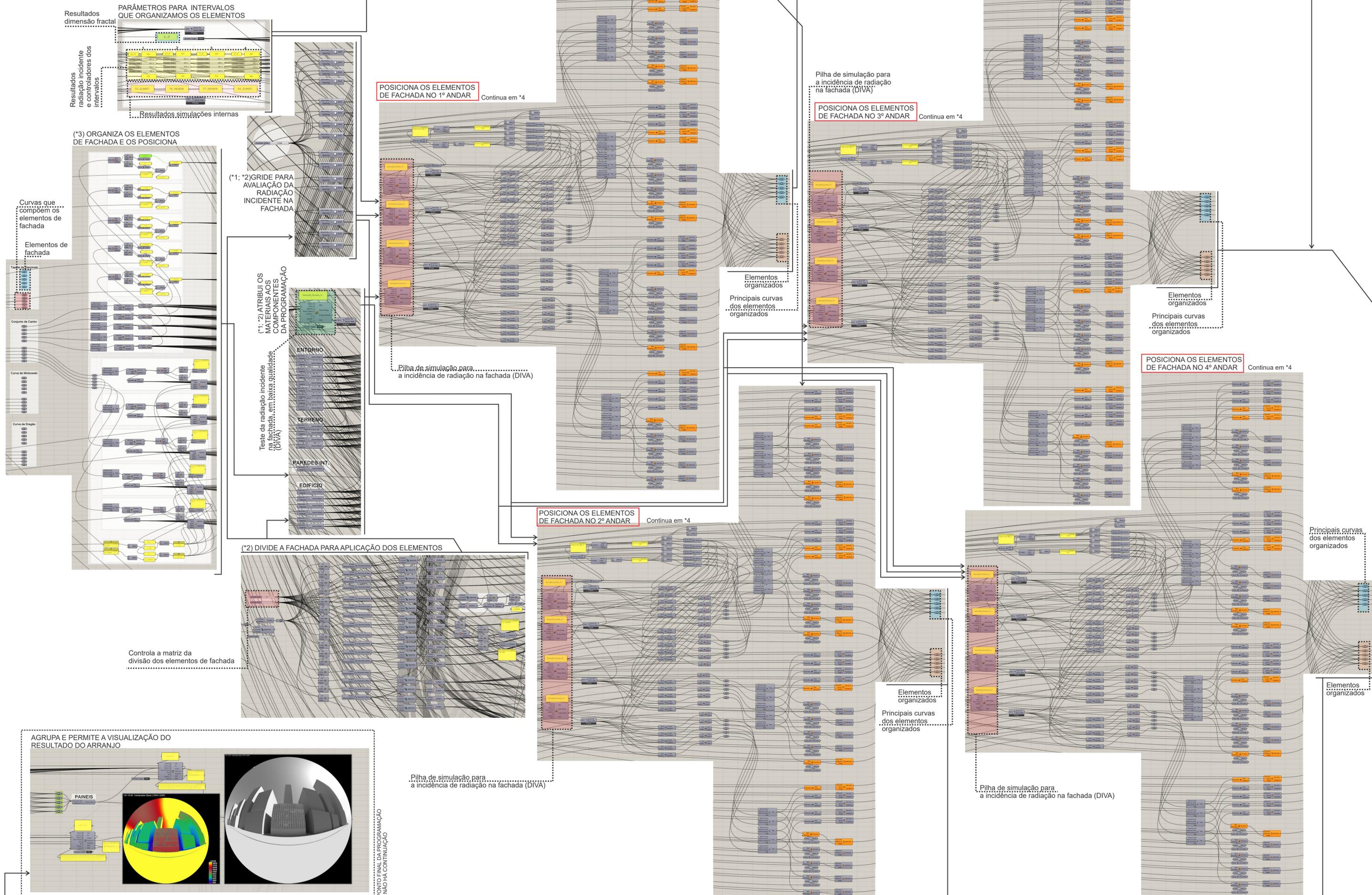


Fonte: O autor.





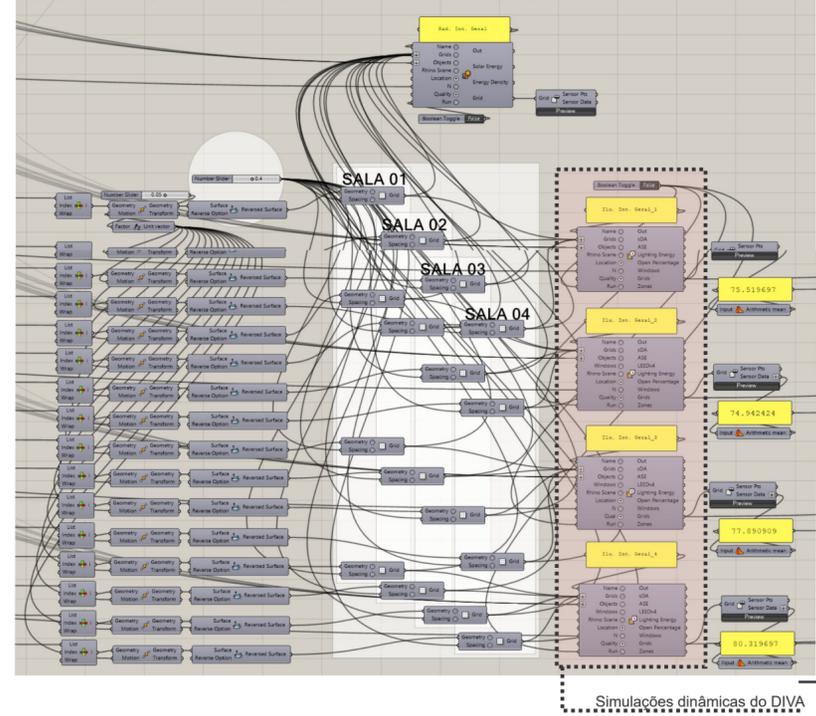
- Painel do Grasshopper
- Cluster, programação feita agrupada em uma pilha
- Continua em uma etapa seguinte



Cluster, programação feita agrupada em uma pilha   Continua em uma etapa seguinte

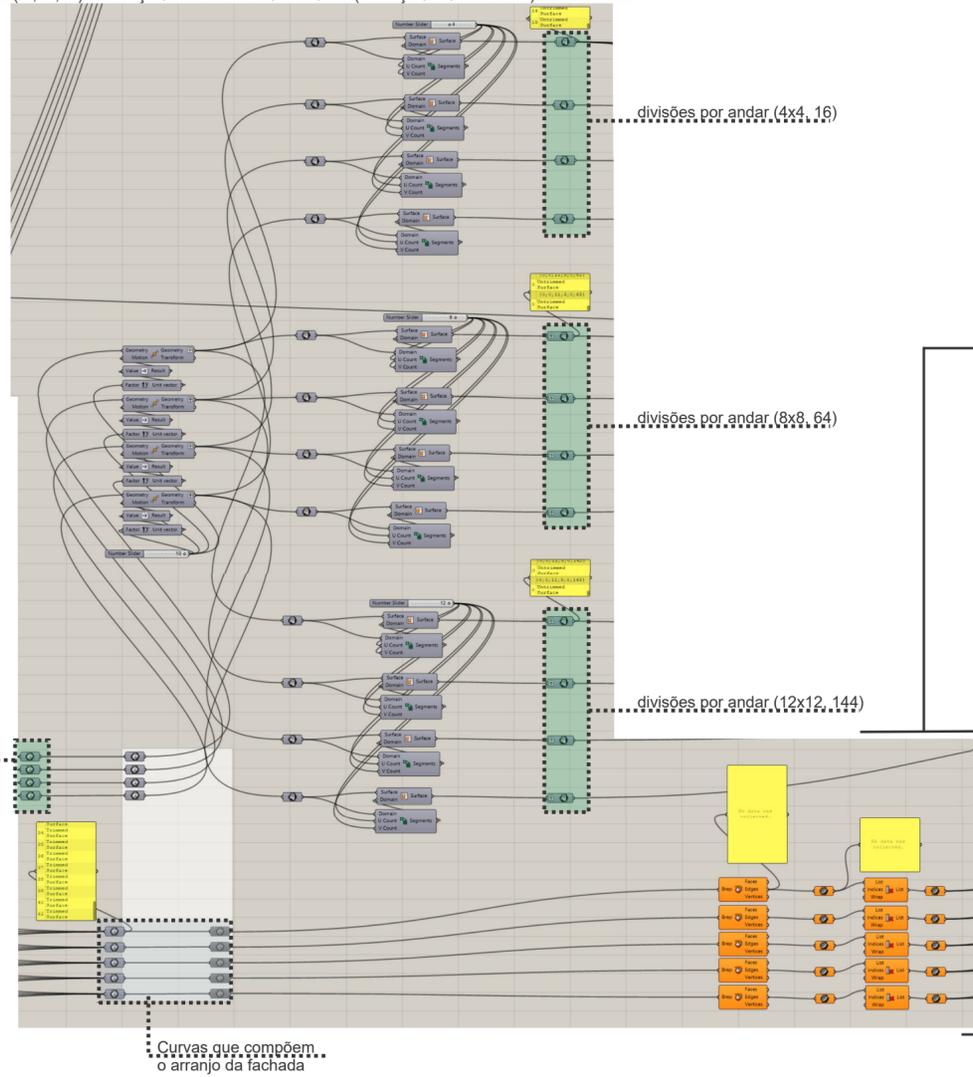
Painel do Grasshopper

(\*1; \*2; \*4) SIMULAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DO AMBIENTE INTERNO (DIVA)

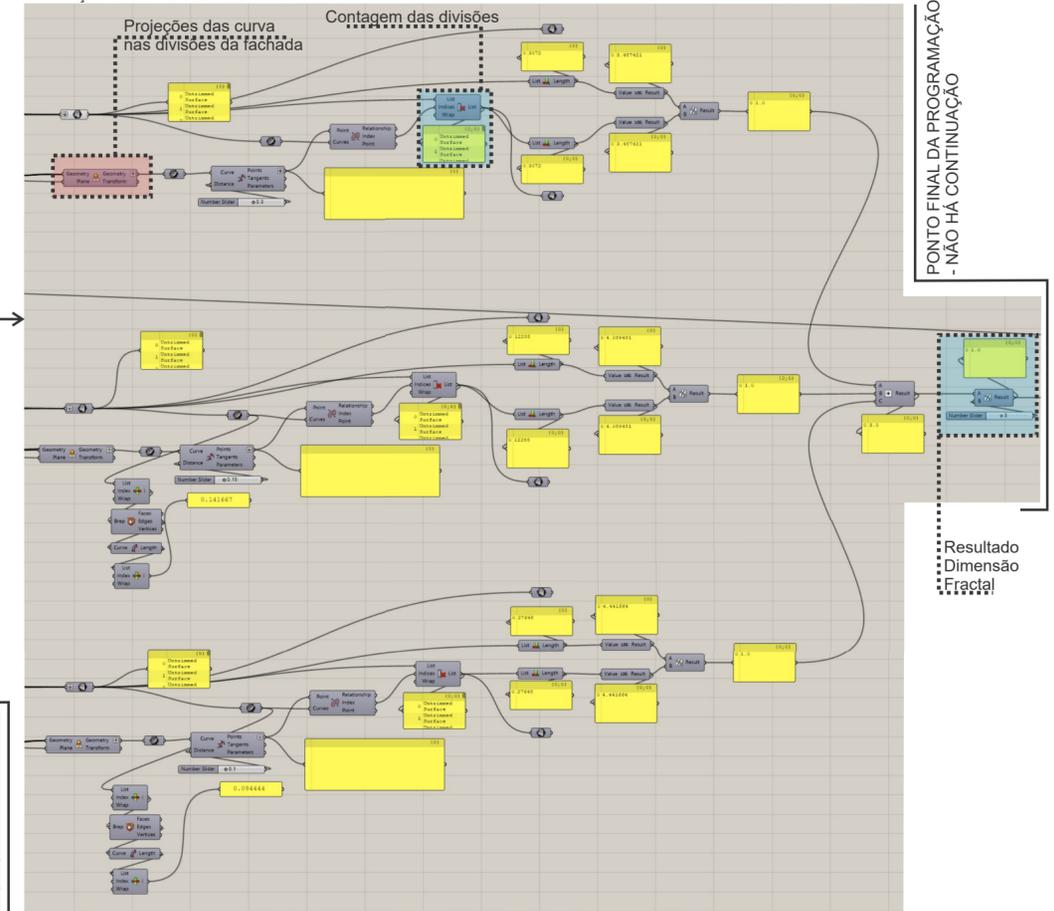


PONTO FINAL DA PROGRAMAÇÃO - NÃO HÁ CONTINUAÇÃO

(\*1; \*2; \*4) AVALIAÇÃO DA DIMENSÃO FRACTAL (SELEÇÃO DOS PAINÉIS)



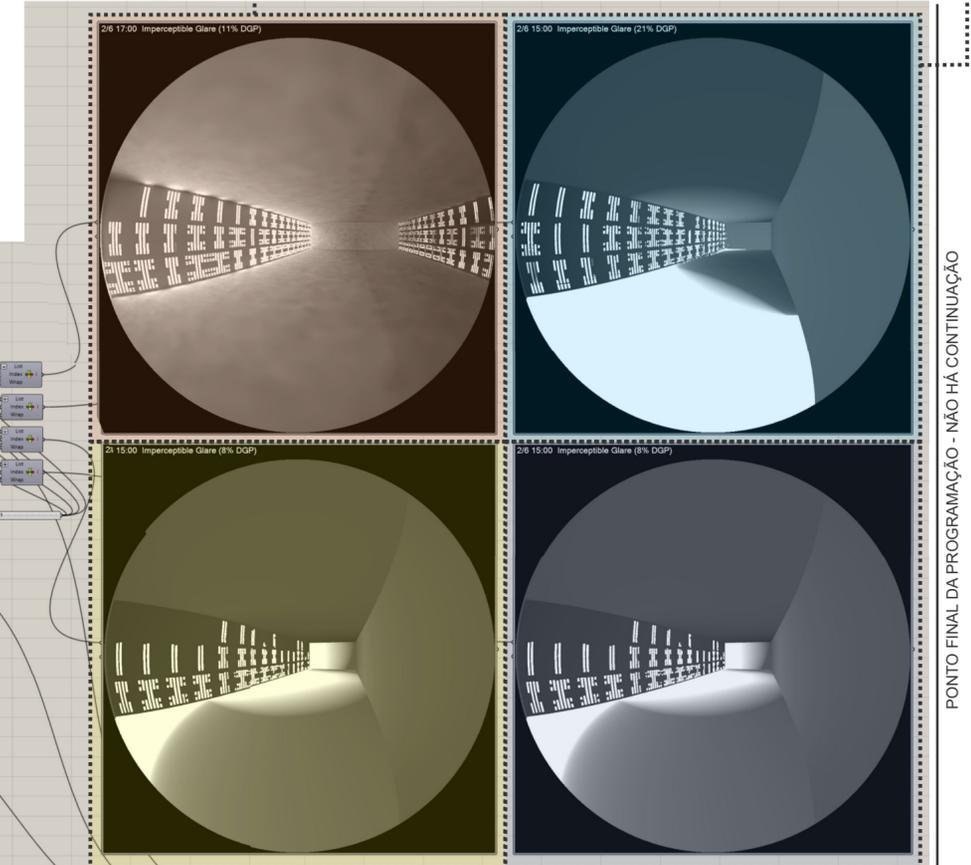
AVALIAÇÃO DA DIMENSÃO FRACTAL



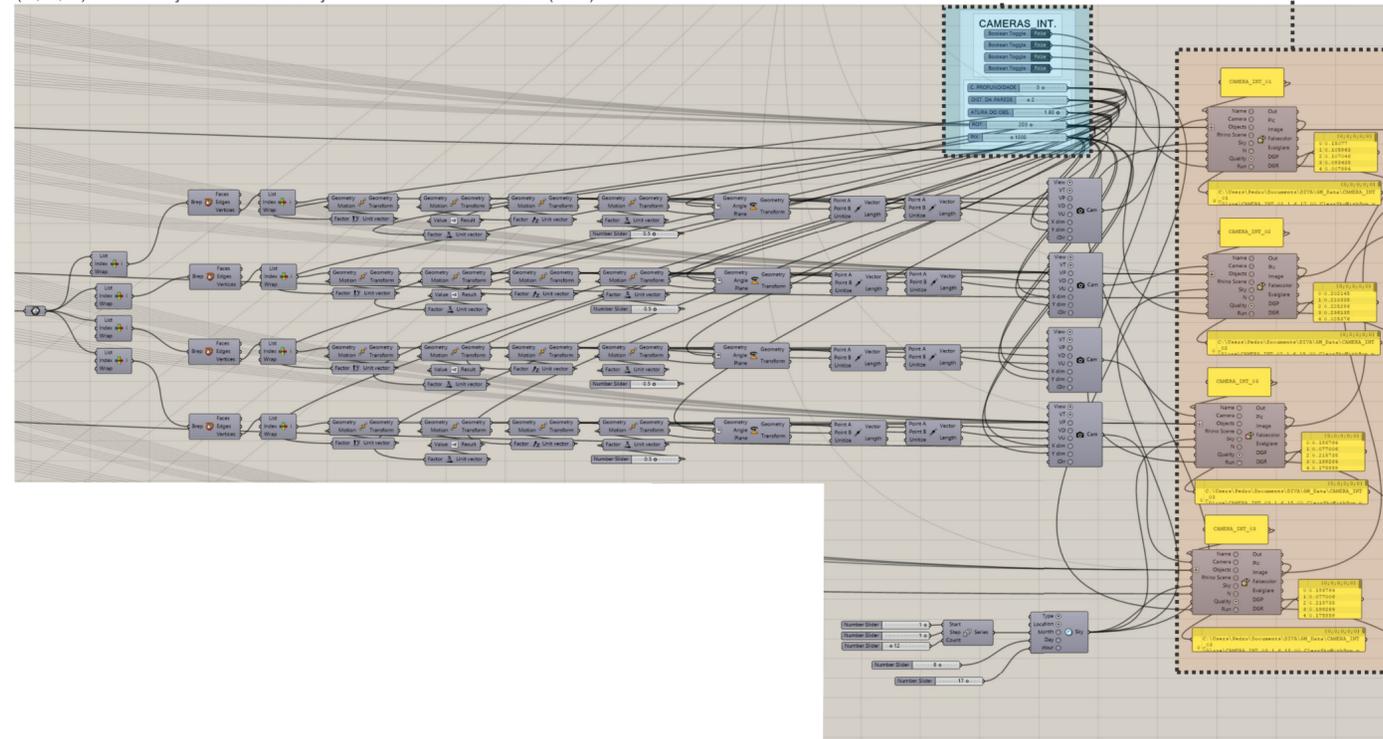
PONTO FINAL DA PROGRAMAÇÃO - NÃO HÁ CONTINUAÇÃO

Visualização 1º andar

Visualização 3º andar



(\*1; \*2; \*4) VISUALIZAÇÃO E RENDERIZAÇÃO INTERNA DOS ANDARES (DIVA)



Visualização 3º andar

Visualização 4º andar

PONTO FINAL DA PROGRAMAÇÃO - NÃO HÁ CONTINUAÇÃO