

AVALIAÇÃO LUMINOSA DE ELEMENTOS DE FACHADA COM CARACTERÍSTICAS FRACTAIS

LIGHT EVALUATION OF FACADE ELEMENTS WITH FRACTIONAL CHARACTERISTICS

Pedro Oscar Pizzetti Mariano¹

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, pedro.pm@hotmail.com

Alice Theresinha Cybis Pereira²

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, acybis@gmail.com

Carlos Verzola Vaz³

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, cev00@gmail.com

Resumo

Este trabalho aborda a confecção e avaliação de elementos de fachada que utilizam as características da geometria fractal, e tem como objetivo averiguar se estes elementos potencializam a utilização da luz natural. Desta forma, dez elementos de fachadas foram desenvolvidos a partir de regras de fractais lineares, utilizando ferramentas de modelagem tridimensional, paramétricas e *plug-ins*, que permitissem recriar algumas das regras de composição dos fractais. Esses elementos foram submetidos em uma composição homogênea em um ambiente virtual construído para simulações dinâmicas, sendo avaliados nas orientações Norte e Sul. Seus resultados foram agrupados em planilhas e gráficos, possibilitando uma avaliação individual de cada composição presente nos diferentes elementos. Os resultados encontrados mostraram que os elementos desenvolvidos com as características fractais apresentam respostas diferenciadas para cada elemento e iterações, demonstrando que a utilização desta geometria como uma forma de controle solar, pode potencializar as condições lumínicas do ambiente interno, além de ampliar o leque de alternativas para o *design* de componentes compositivos para fachadas. Com o algoritmo desenvolvido, também pode-se selecionar os componentes com mais potencialidades para a determinada localidade simulada, permitindo que em futuros estudos ele possa ser alterado em diferentes parâmetros, potencializando suas atribuições como elemento de fachada.

Palavras-chave: Elementos de Fachada. Geometria Fractal. Iluminação. Simulação Dinâmicas.

Abstract

This paper comments on the formulation and evaluation of facade elements that use the characteristics of the fractal geometry, and has the objective to investigate if these elements improve the use of daylight. Thus, ten elements of facades were developed from linear fractals rules, using three-dimensional modeling tools, parametric and plug-ins that allowed to recreate some of the composition rules of the fractals. These elements were submitted to a homogeneous composition in a virtual environment of dynamic simulations, being evaluated in the North and South orientations. Their results were grouped in spreadsheets and graphs, allowing an individual evaluation of each composition present in the different elements. The results show that the elements developed with the fractal characteristics present different results for each element and iterations, demonstrating that the use of this geometry as a form of solar control can enhance the lighting conditions of the internal environment, and increase the range of alternatives for the design of components for facades. The developed algorithm also allowed to select components with more potentialities for the simulated locality, allowing that in future studies it can be altered in different parameters, potentializing its attributes as a facade element.

Keywords: Facade elements. Fractal Geometry. Lighting. Ligthning. Simulation Dynamics.

How to cite this article:

MARIANO, Pedro Oscar Pizzetti; PEREIRA, Alice Theresinha Cybis; VAZ, Carlos Verzola. Avaliação luminosa de elementos de fachada com características fractais. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 9, n. 1, p. 3-18, mar. 2018. ISSN 1980-6809.

Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650255>>. Acesso em: 03 fev. 2018.

doi:<http://dx.doi.org/10.20396/parc.v9i1.8650255>.

Introdução

As geometrias as desenvolvidas por Euclides, descrevem formas regulares, focadas no estudo da geometria plana e espacial, e podem ser geradas por meio de operações e instrumentações manuais. Composições criadas por estes princípios possibilitam a emergência de organizações regulares, amplamente difundidas no desenvolvimento da gramática formal das construções humanas. O emprego das proporções e geometrias euclidianas foram e vêm sendo utilizadas não só em construções, mas também em mosaicos, pinturas, esculturas e em outras expressões artísticas. Muitas destas composições utilizavam-se de padrões matemáticos, como a proporção áurea, para agregar valor estético e de harmonia em inúmeras criações. (WAIHRICH et al, 2010; BAIER; SEDREZ, 2013).

Os modelos gerados a partir da geometria euclidiana e da matemática, com o objetivo de reproduzir padrões geométricos da natureza, podem ser identificados nos campos da educação, artes e arquitetura. Contudo, estas geometrias tradicionais podem se mostrar inadequadas ou incompletas para recriar tais padrões, pois muitas das formas encontradas na natureza não pertencem ao grupo das geometrias euclidianas. (ASSIS et al 2008; CHING, 1998).

Profissionais como arquitetos, *designers* e engenheiros, durante o desenvolvimento de seus projetos, buscam se inspirar em formas geradas na natureza. No entanto, se apropriar de suas características geométricas, apenas utilizando-se dos princípios da geometria euclidiana, pode ser uma tarefa exaustiva. A apropriação destas formas naturais pode ser potencializada pela utilização de conceitos da geometria fractal. (RIAM; ASAYAMA, 2016).

Segundo Riam e Asayama (2016), após a descrição da geometria fractal na década de 1980, profissionais de diferentes áreas, tais como a medicina e a arquitetura e urbanismo, se apropriaram de seus conceitos com o objetivo de captar a essência compositiva de formas geradas pela natureza. No campo da arquitetura e urbanismo a geometria fractal também foi incorporada, porém limitada a uma análise visual do edifício ou da cidade. Contudo, suas características permitem a aplicação em diferentes campos relacionados à concepção do edifício e da cidade.

Para os autores Gürbüz, Çagdas e Alaçam (2010), a utilização das características da geometria fractal pode proporcionar uma alternativa para diversas soluções de projeto, já que, com a utilização das características fractais pode-se gerar inúmeros modelos abstratos para estudos iniciais em diferentes escalas.

Asayama e Mae (2014 e 2015), descrevem como um outro exemplo da utilização das características dos fractais a sua aplicação em estruturas. Para eles, os sistemas estruturais e seus respectivos desenhos são baseados puramente em formas euclidianas e racionais, supondo que estas geometrias têm prospecções mais seguras para a arquitetura. Porém as estruturas que compõem os corpos de formas naturais como árvores, cristais e montanhas em suma não apresentam estruturas racionais ou lineares, e ainda assim apresentam uma boa resposta estrutural. Os autores demonstram que os trabalhos acadêmicos que apresentam o tema dos fractais, em parte, são voltados à ideia do desenvolvimento de sistemas estruturais, deixando de lado a sua implementação em diversos campos da arquitetura, como iluminação, acústica, etc.

Outra característica importante que se pode verificar nestas composições geométricas é sua capacidade de reduzir o desgaste mental do usuário. Segundo Wise e Rosemberg (1986), Salingaros (2003 e 2012) e Taylor (2006), a utilização de composições geradas a partir de princípios da geometria fractal em elementos visuais também podem trazer respostas positivas à nossa cognição, devido a causas hereditárias, biológicas e extintivas, ocasionando assim uma redução do stress mental.

Sendo assim, com o intuito de verificar e aplicar a utilização das características fractais, este trabalho propôs o desenvolvimento de algoritmos que reproduzissem os padrões da geometria fractal em elementos de controle solar para fachadas. Durante a pesquisa, buscou-se demonstrar o potencial da utilização de componentes gerados por meio de regras fractais como elementos de proteção de fachada, analisando parâmetros de iluminação natural, a partir de métricas internacionais já consolidadas, e a capacidade de variação geométrica

Fundamentação

Com o aumento da porcentagem de área envidraçada nas fachadas, os elementos de controle solar estão desempenhando cada vez mais um papel fundamental na proteção dos ambientes internos das edificações. O desenvolvimento de anteparos para a proteção de fachadas e otimização do conforto ambiental em espaços internos, apresenta uma longa história. Exemplos podem ser identificados em painéis de portas e janelas chinesas, em painéis Muxarabis islâmicos ou no *brise soleil*, amplamente utilizado na arquitetura moderna (SOUZA, 2012). Esses sistemas, além de filtrarem a luz que penetra nos ambientes internos de uma edificação, proporcionando o conforto visual interno e o controle de ganhos térmicos, possuem um peso considerável na composição do edifício, podendo ter diferentes materiais e tecnologias empregadas. Sendo assim, a decisão de implementar

elementos de fachada, torna-se uma decisão realizada na concepção do partido arquitetônico, implicando na relação entre os espaços internos e externos, organização dos planos verticais e horizontais, permeabilidade no interior do projeto e, estanqueidade pelo uso de materiais opacos. (CUNHA, 2011; ZUHAIB et al, 2016).

Segundo Cartana, Pereira e Berté (2016), novas ferramentas e *softwares*, que auxiliam no desenvolvimento de modelos paramétricos, possibilitam que o modelo possa ser alterado constantemente, e que sejam geradas pré-visualizações do resultado final. Tais modelos paramétricos potencializaram ainda mais o estudo de sistemas de proteção de fachadas tornando possível simular diferentes parâmetros de luz natural, a troca de calor entre ambientes, o processo de ventilação e características compositivas.

Geometria Fractal

A busca pela analogia às formas presentes na natureza pode ser observada nas ornamentações das colunas egípcias, nos padrões das ordens gregas, nos detalhes estruturais e decorativos das catedrais e, entre outras inúmeras obras, em diferentes localidades e períodos históricos. A analogia de características geométricas presentes em composições naturais, em elementos arquitetônicos, fundamenta-se no interesse humano em se apropriar de padrões. Pode ser citado como um dos exemplos presentes no campo da arquitetura e urbanismo, os padrões de medidas humanas criados por Leonardo da Vinci (o homem vitruviano) e Le Corbusier (o Modulor). (RUMIEZ, 2013).

A busca pelo descobrir destas novas interpretações das forças caóticas na natureza resulta em conhecimentos nas ciências complexas do caos. Para Hyötyniemi (2004), estas ciências complexas são denominadas de Limite do Caos (*edge of chaos*) e estão situadas entre os campos da estatística e do comportamento caótico. Seu objetivo é descobrir como a desordem pode ter ordem, inserindo assim, a noção de auto-organização e princípios não lineares. A partir dos princípios das ciências complexas buscou-se descrever uma geometria que se assemelhasse às estruturas identificadas na natureza, resultando assim nos fractais. Harris (2007), descreve que os primeiros estudos formalizados de Benoit Mandelbrot sobre os padrões fractais tiveram início na década de 1950. Mas esse termo só foi citado pela primeira vez por Mandelbrot em 1977, com a publicação de seu livro "*The Fractal Geometry of Nature*", utilizando o adjetivo do latim "*fractus*" e do verbo "*frangere*", que possuem o significado de quebra.

Um fractal é uma estrutura que apresenta invariância independente da escala em que é observado, sempre estando atrelado a um mesmo padrão ou forma, mantendo

a sua estrutura original idêntica. O desenvolvimento de um fractal e seus padrões matemáticos descritos por sua forma são derivados de quatro principais características: auto-similaridade; complexidade infinita; irregularidade (rugosidade); e uma dimensão não inteira. (MANDELBROT, 1977).

A auto-similaridade, é uma característica que se constitui quando uma porção da figura ou contorno é uma réplica de um conjunto inteiro, em escalas menores ou maiores. Sendo assim, uma determinada forma é mantida independente da escala do observador. Essa característica pode ser compreendida de maneira sucinta observando-se alguns objetos naturais como os brócolis, a couve flor ou as folhas da samambaia, além de outras composições naturais. Como exemplo, podemos demonstrar na Figura 1, uma forma fractal construída interativamente por meio da auto-similaridade, onde a primeira linha é dividida em duas seguintes, seguindo um determinado padrão e escala. E este mesmo padrão é repetido em cada linha, repetindo o processo infinitas vezes. (MANDELBROT, 1977).

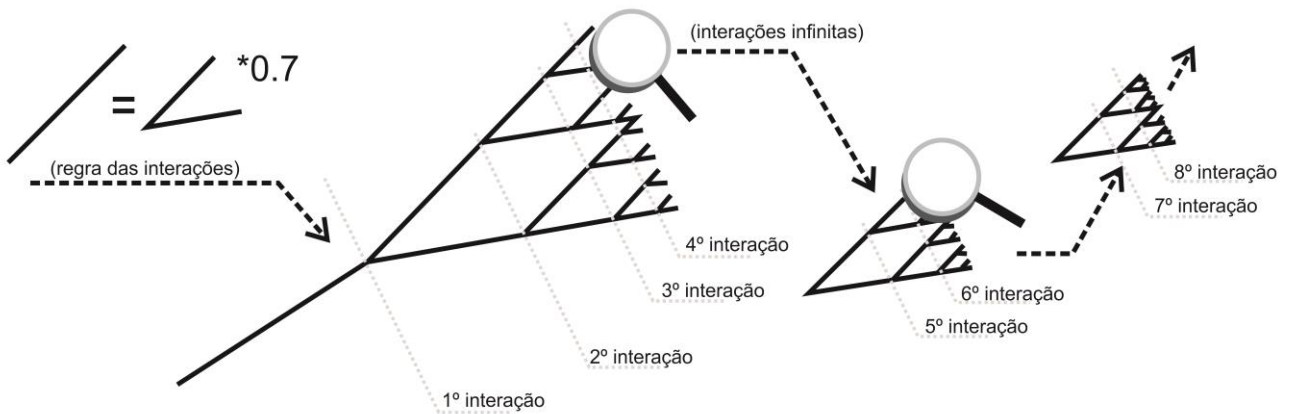
A complexidade infinita, refere-se ao processo recursivo para a criação de um elemento, ou seja, as interações para criar um determinado elemento podem ser ilimitadas, podendo gerar assim, figuras em escalas ínfimas. Sobre o atributo da irregularidade, essa característica tem como sentido de rugosidade ou não suavização, referindo-se às partes que têm sua forma extremamente irregular, interrompidas ou fragmentadas, em qualquer escala observada. (ASSIS et al 2008, MANDELBROT 1977).

A última característica dos fractais descritas por Mandelbrot (1977), é a sua dimensão. A dimensão dos fractais também é utilizada em outros campos multidisciplinares, como nos diagnósticos de câncer, no desenvolvimento de antenas, na mineralogia, biologia, meteorologia, economia, ecologia, eletrônica, química, entre outras disciplinas. (ASSIS et al, 2008; SAMPER; HERRERA, 2016; TRACADA 2016).

Dimensão Fractal

Spehar et al, (2003) comentam que, a visualização da dimensão "D" pode ser observada em diferentes fractais, como os presentes na natureza (árvores, montanhas, ondas, etc.), matemática (simulações computacionais de linhas de fronteira) e artes, (pintura, escultura, etc.). A técnica para a contagem da dimensão fractal também é aplicada em outros campos da ciência, para identificar outras formas vivas que tem determinadas características de crescimento. Essa dimensão fractal "D" é determinada ao comparar o número de quadrados ocupado em uma malha (*mesh*) em diferentes escalas. Mandelbrot (1977), desenvolveu essa técnica, afirmando que os diversos padrões fractais podem ser medidos utilizando o *box-counting*.

Figura 1 - Representação da auto-similaridade e complexidade infinita em um exemplo de regra fractal

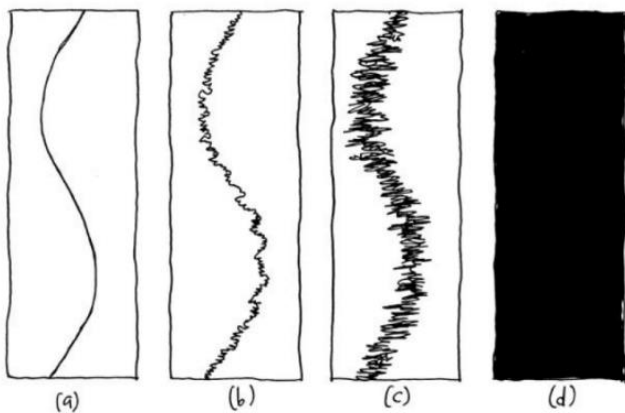


Fonte: Os autores.

Lorenz (2009), descreve que diversos objetos fractais não contêm regras e padrões de interação de fácil interpretação. Para estes objetos ou construções, a utilização de um método denominado “*box-counting*,” é descrito como um procedimento para encontrar a dimensão “D” em diferentes formas e figuras. O método funciona a partir da contagem (Nm) de caixas existente no contorno de certa rugosidade ou estrutura a partir de uma malha. Em seguida, o tamanho da malha que envolve a figura é reduzido em uma escala (Sn), e o número das caixas preenchidas são contadas novamente.

A utilização de regras na composição de estruturas tridimensionais demonstra que a mudança na proporção dos fractais “D” é perceptível tratando-se das características de rugosidade, complexidade e auto-similaridade. É demonstrada a preferência humana pela dimensão fractal de 1,3 até 1,5. Na Figura 2, é exemplificada a dimensão fractal “D” aplicada a uma linha. (SALINGAROS, 2012).

Figura 2 – Dimensão D, (a) D=1 (não fractal); (b) D=1.2; (c) D=1.7; (d) D=2 (não fractal)



Fonte: Salingaros (2012).

A ação psicológica dos fractais

Os fractais, além de apresentarem qualidades geométricas singulares, que permitem a formação de composições com formas complexas, ainda podem beneficiar uma leitura psicológica positiva do espaço que nos cerca. Spehar et al (2003) afirmam que a visão humana apresenta diferentes respostas positivas ao observar figuras com composições fractais, sendo estas organizações desenvolvidas pela natureza, pelos processos matemáticos ou por intermédio humano.

A redução do stress em ambientes com características fractais é descrita na pesquisa de Wise e Rosemberg (1986). Em seu trabalho, voluntários divididos em três grupos foram submetidos individualmente a realizarem tarefas mentais, como contas aritméticas, a resolução de problemas de lógica e de pensamento criativo. Os diferentes grupos realizam as atividades na presença de uma imagem de um metro de altura por dois metros de largura. Esta poderia conter uma figura de cor pura, uma imagem de um agrupamento de árvores ou uma árvore isolada em uma savana. Para mesurar o nível de stress durante a atividade, foram colocados eletrodos que mediam a condução elétrica na pele dos participantes. Os resultados demonstraram que, os convidados a participarem da experiência expostos ao fundo de cor branca tiveram um aumento de stress em média de 15%. Já os participantes sujeitos a tarefas com o painel das florestas tiveram uma redução no stress de 3%. Os participantes que executaram as atividades com a imagem da savana tiveram seu stress reduzido em 44%. Contudo, na última situação, a imagem da savana não era uma fotografia, e sim uma figura composta por inúmeros fractais. Na Figura 3, são apresentadas duas das imagens utilizadas no experimento, sendo uma delas a composição fractal da savana. (WISE; ROSEMBERG 1986)

Figura 3 – Dimensão D, (a) D=1 (não fractal); (b) D=1.2; (c) D=1.7; (d) D=2 (não fractal)



Fonte: Wise e Rosenberg (1986).

Com base no estudo de Wise e Rosenberg (1986), Taylor (2006), Salingaros (2003) e Joye (2007) desenvolveram um conjunto de sete possíveis razões que associam características da geometria fractal a uma resposta positiva da nossa mente. As razões compreendem desde processos da nossa estrutura biológica, como organização cerebral, batimentos cardíacos, movimentação dos olhos, e ações do instinto, a padrões evolutivos como, captação de informação, instinto de sobrevivência e expressões artísticas.

Método

Buscando-se desenvolver elementos que possibilitem controlar a entrada da iluminação natural por meio de simulações e ferramentas paramétricas, optou-se pela utilização das características da geometria fractal como modelo norteador para o desenvolvimento do desenho dos brises. As características fractais foram escolhidas, pois, mesmo havendo expressiva produção científica a respeito de seu uso, há poucos resultados da utilização de seus padrões como elemento de controle solar.

Para o desenvolvimento dos elementos de fachada com as características dos fractais, foi necessário pesquisar ferramentas que possibilitassem a implementação de geometrias fractais, que possibilitassem a modelagem tridimensional de elementos de proteção de fachada e que permitissem a simulação segundo diferentes métricas lumínicas. Hutchinson (1981), descreve que o início de um sistema de iteração teve o seu desenvolvimento em 1981, o IFS “*iterated function system*”, (sistema de função iterada), onde era possível observar as formas finais dos fractais após diversas iterações. Como uma das características dos fractais é a construção da sua forma a partir de iterações recursivas, utilizou-se um *plug-in* do Grasshopper, o Hoopsnack, que permite a criação deste tipo de sistema de iteração.

O *plug-in* Grasshopper na qual foi utilizado o complemento hoopsnack, é uma ferramenta de programação visual ou “*visual programming languages*” (VPL). Este modelo de programação é organizado e desenvolvido a partir de elementos gráficos já existentes, que são movimentados, ajustados e conectados, formando assim o código desejado. Nos VLP’s, a programação é organizada de forma analógica, por meio de caixas e fios (“*box-and-wire*”) que se interligam, formando a lógica de programação. Nesse paradigma de programação há uma

série de fatores que facilitam o processo de aprendizado, como por exemplo: não ser necessário declarar variáveis, não precisar seguir um plano de ação, e a inexistência de regras de sintaxe (CELANI; VAZ, 2012).

Elementos de Fachada

Para a concepção formal dos diferentes elementos, foram utilizados fractais lineares. As dez regras lineares fractais utilizados no trabalho são: Square 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. As regras destes fractais foram representadas por meio de regras esquemáticas de gramática de forma, que definem o processo de interação.

Assim como desenvolvido no trabalho de Sedrez e Meneghel (2013), os fractais foram implementados no *software* Rhinoceros, por meio do *plug-in* Grasshopper e Hoopsnack. O processo de geração dos modelos paramétricos foi realizado já considerando algumas características dos elementos de proteção de fachada. Como resultado, no ambiente de modelagem foram parametrizadas as dimensões da chapa, escala das aberturas, etc. Estes parâmetros foram ajustados conforme as características geométricas dos elementos, prevendo o futuro processo de prototipagem e de montagem. Contudo, o presente estudo tem como foco os possíveis resultados lumínicos dos elementos de fachada, sendo que características relacionadas a sua materialização, tais como encaixes, estruturação e fabricação serão estudadas em etapas posteriores. A Figura 4 demonstra um fluxograma genérico de como foi desenvolvido cada elemento de fachada, e a Figura 5 demonstra o algoritmo completo com todas as sequências de cada elemento.

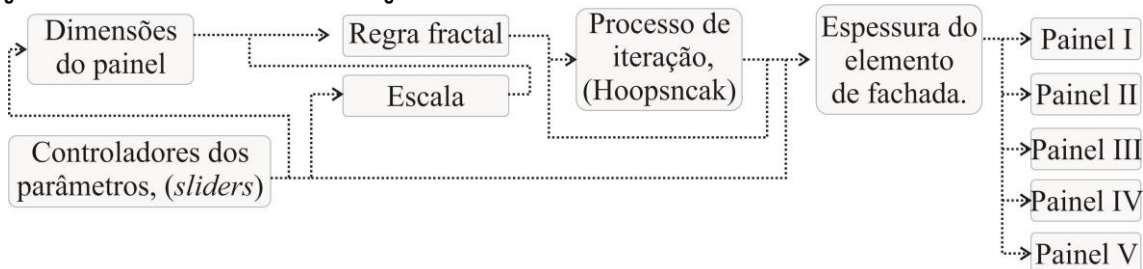
As regras em alguns dos elementos foram modificadas ou complementadas por outros passos, buscando com que o resultado formal do elemento, se assemelhasse com o fractal utilizado. As figuras a seguir mostram cada um dos modelos gerados a partir dos fractais *Square Gasket* (Figuras 6 e 7), *Jerusalém Cross* (Figuras 8 e 9), do Tapete de Sierpinski (Figuras 10 e 11), Conjunto de Cantor (Figuras 12 e 13), Triângulo de Sierpinski (Figuras 14 e 15), Curva de Minkowski (Figura 16 e 17), Curva de Peano (Figura 18 e 19), Curva de Dragão (Figura 20 e 21), *Fractal Tree* (Figura 22 e 23) e Ilha de Koch (Figura 24 e 25).

Para cada um dos dez fractais foram criadas cinco variações. Estas variações foram geradas a partir do número de interações das regras (aplicadas no máximo quatro vezes), totalizando a criação de 50 painéis diferentes. Para todos os fractais, a primeira iteração (superfície opaca) de cada regra fractal possui a mesma forma, pois é o elemento iniciador do processo, e é nele

que serão feitas as modificações. Sendo assim, as simulações representadas neste trabalho que demonstram os resultados da composição do primeiro elemento tiveram seu resultado nulo, ou seja, não há iluminação natural no ambiente. Entretanto, mesmo não permitindo a entrada da

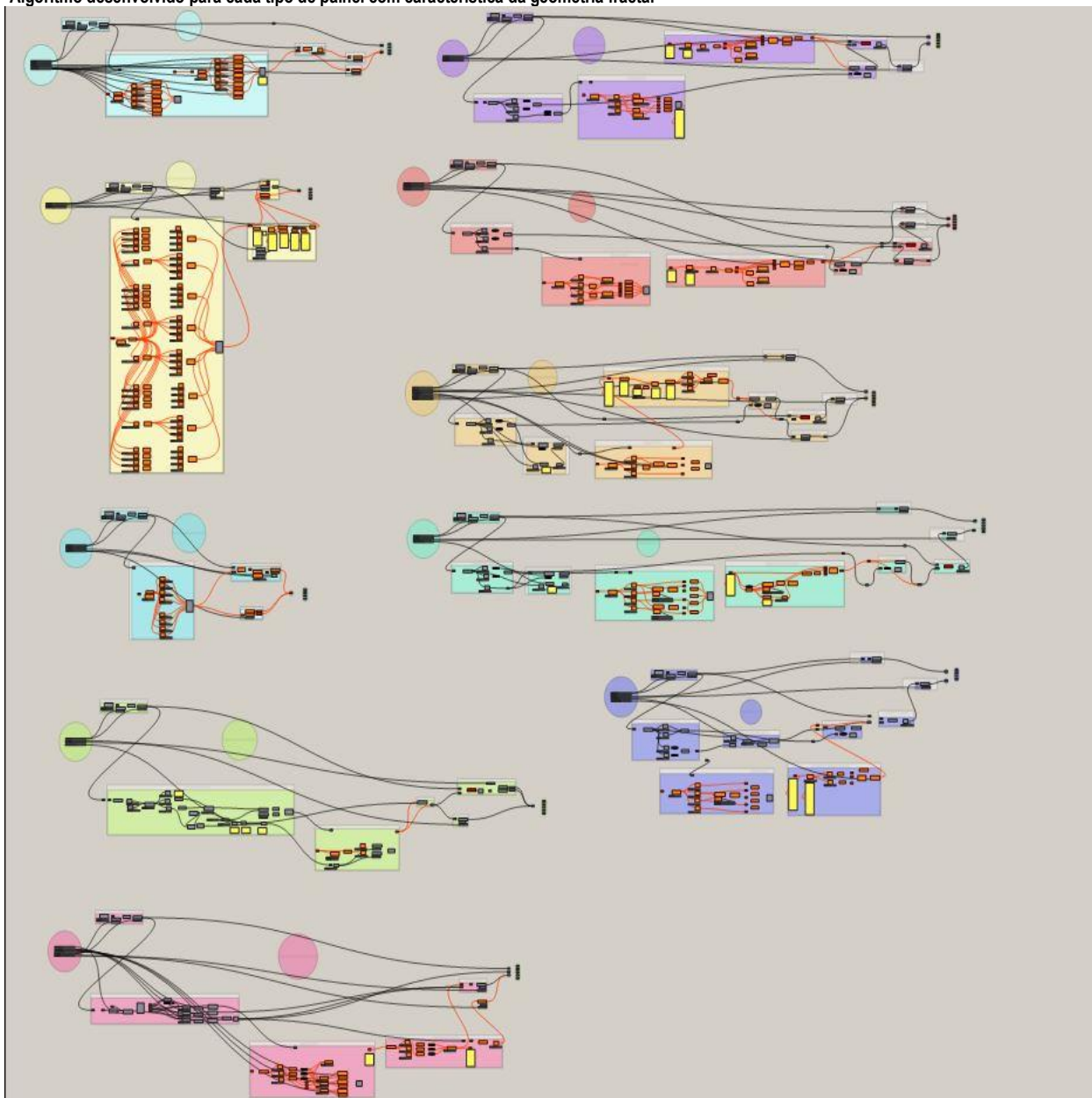
luz natural, esse primeiro elemento tem um papel importante quando se desenvolvem composições com as demais iterações, pois possibilita que, na organização dos painéis, ele possa ser implantado em uma área que receba excessiva insolação.

Figura 4 – Fluxograma demonstrativo do funcionamento do algoritmo de cada elemento de fachada



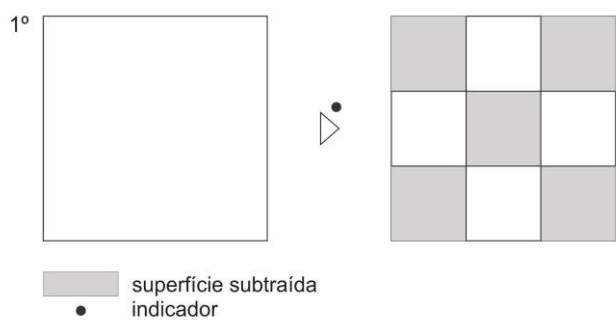
Fonte: Os autores.

Figura 5 – Algoritmo desenvolvido para cada tipo de painel com característica da geometria fractal



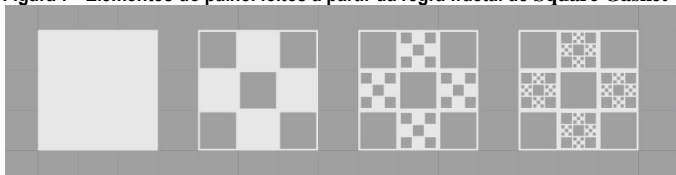
Fonte: Os autores.

Figura 6 – Regra que norteou o *design* do elemento Square Gasket



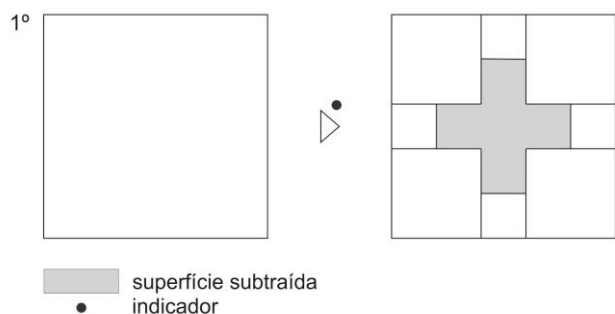
Fonte: Os autores.

Figura 7 – Elementos do painel feitos a partir da regra fractal do Square Gasket



Fonte: Os autores.

Figura 8 – Regra que norteou o *design* do elemento Jerusalém Cross



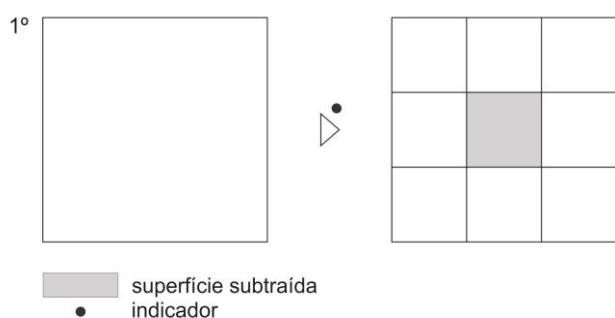
Fonte: Os autores.

Figura 9 – Elementos do painel feitos a partir da regra fractal Jerusalém Cross



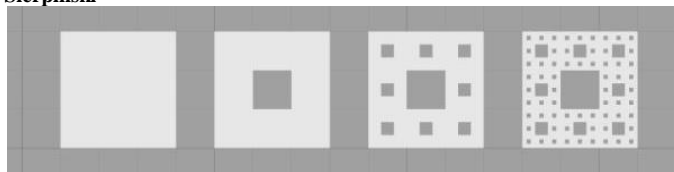
Fonte: Os autores.

Figura 10 – Regra que norteou o *design* do elemento Tapete de Sierpinski



Fonte: Os autores.

Figura 11 – Elementos do painel feitos a partir da regra fractal Tapete de Sierpinski



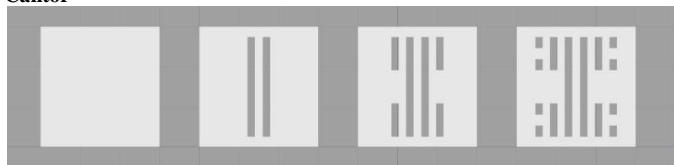
Fonte: Os autores.

Figura 12 – Regra que norteou o *design* do elemento Conjunto de Cantor



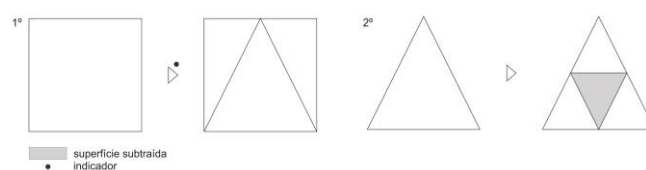
Fonte: Os autores.

Figura 13 – Elementos do painel feitos a partir da regra fractal Conjunto de Cantor



Fonte: Os autores.

Figura 14 – Regra que norteou o *design* do elemento Triângulo de Sierpinski



Fonte: Os autores.

Figura 15 – Elementos do painel feitos a partir da regra fractal Triângulo de Sierpinski



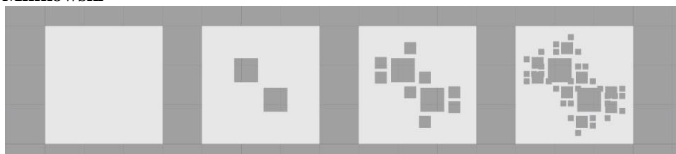
Fonte: Os autores.

Figura 16 – Regra que norteou o *design* do elemento Curva de Minkowski



Fonte: Os autores.

Figura 17 –Elementos do painel feitos a partir da regra fractal Curva de Minkowski



Fonte: Os autores.

Figura 18 – Regra que norteou o design do elemento Curva de Peano



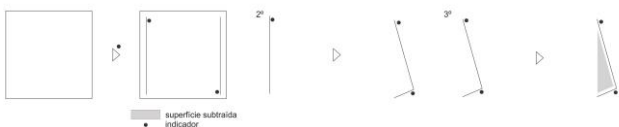
Fonte: Os autores.

Figura 19 –Elementos do painel feitos a partir da regra fractal Curva de Peano



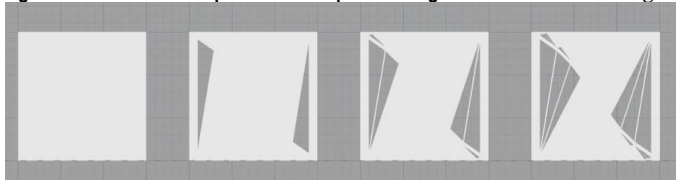
Fonte: Os autores.

Figura 20 – Regra que norteou o design do elemento Curva de Dragão



Fonte: Os autores.

Figura 21 –Elementos do painel feitos a partir da regra fractal Curva de Dragão



Fonte: Os autores.

Figura 22 – Regra que norteou o design do elemento Fractal Tree



Fonte: Os autores.

Figura 23 –Elementos do painel feitos a partir da regra fractal, Fractal Tree



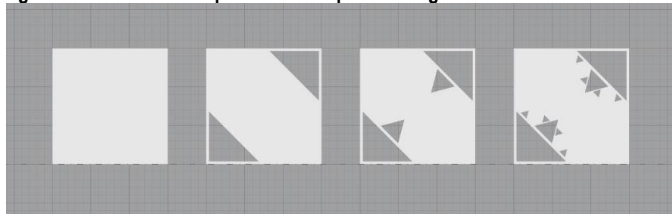
Fonte: Os autores.

Figura 24 – Regra que norteou o design do elemento Ilha de Koch



Fonte: Os autores.

Figura 25 –Elementos do painel feitos a partir da regra fractal Ilha de Koch.



Fonte: Os autores.

Ambiente virtual para simulações

Para que os resultados lumínicos provenientes da simulação de cada painel fossem confiáveis, o modelo de um ambiente virtual paramétrico foi criado no Rhinoceros 3D, em conjunto com o *plug-in* Grasshopper. Foram definidas como dimensões deste “espaço” 6m de profundidade, por 6m de largura e 3m de altura. Além disso, considerou-se este ambiente como sendo térreo e seu posicionamento foi pensado para que duas de suas faces estivessem em eixos cardeais norte e sul. A parametrização permite que seja selecionada qualquer fachada dentre as quatro e substituí-la pelos elementos de proteção, permitindo assim, que na construção, apenas uma tenha permeabilidade para a entrada de luz.

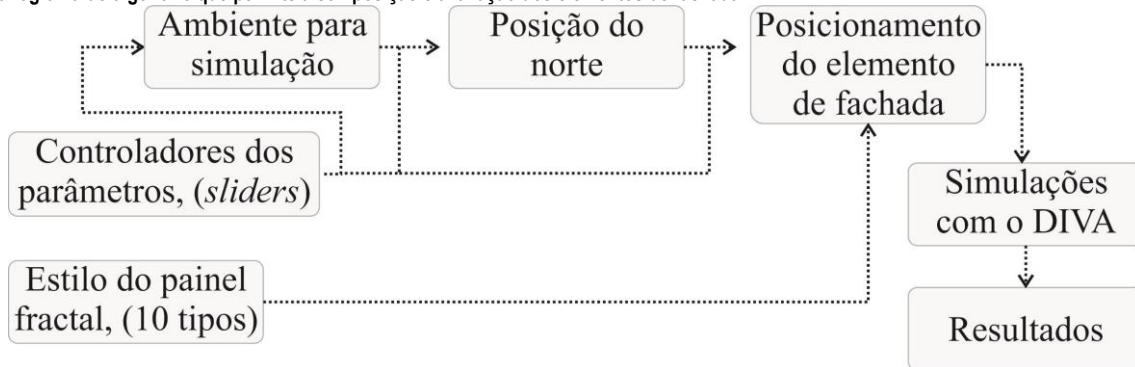
O modelo foi ajustado para que cada uma das fachadas pudesse ser composta por um total de 8 painéis, cada um deles como a mesma dimensão (1,5 x 1,5m). Todos os elementos utilizados nas composições foram ajustados de modo que seus parâmetros fossem iguais, possibilitando uma interpretação mais coesa de seus resultados. Assim, os painéis possuem a espessura de 0,3 mm, e nenhum deles recebeu quaisquer tipos de elementos adicionais, como prateleiras de luz, estrutura, perfurações, etc. O modelo final desta etapa do algoritmo pode ser interpretado pela Figura 26, que demonstra um fluxograma do funcionamento da composição dos painéis e simulação. Em seguida, a Figura 27 representa uma amostra do ambiente virtual onde foram feitas as simulações.

As métricas lumínicas utilizadas no trabalho seguiram os modelos da IES (*Illumination Engineering society*) e da ASHRAE, sendo que foram considerados índices e padrões que podem caracterizar a quantidade de luz em um determinado ambiente. Boyce (1996), descreve que os níveis de iluminação recomendados para determinados ambientes não são baseados somente na quantidade de luz necessária para realizar uma tarefa com precisão, como cognição e coordenação motora.

Dentre os diferentes tipos de simulação que poderiam ser avaliadas, 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 métricos das simulações dinâmicas possuem relevante significância na interpretação da luz natural, podendo ser acessados e interpretados por profissionais que não possuem notório saber sobre ferramentas de simulação. De acordo com Mcneil e Lee (2012), as

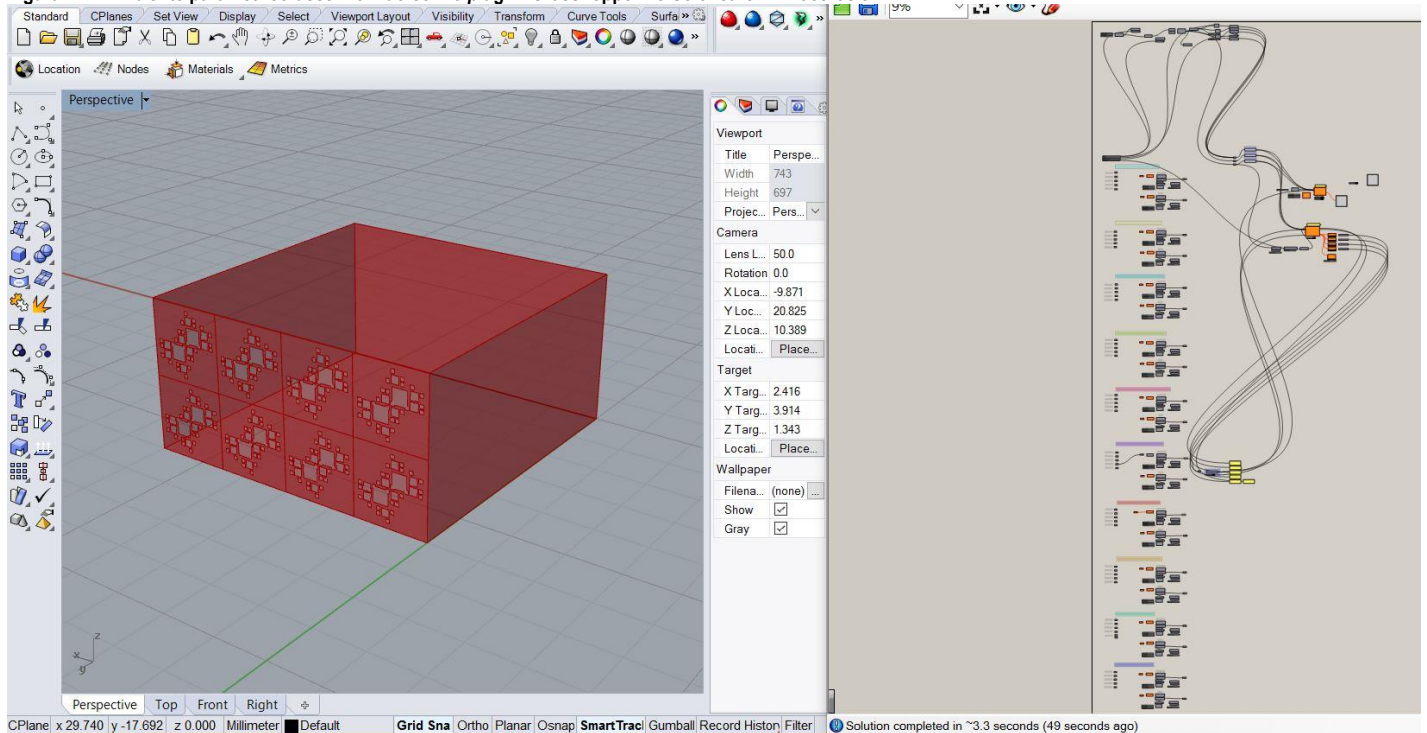
simulações dinâmicas são constituídas pela análise da radiação diurna, sendo uma das primeiras ferramentas a utilizar essa abordagem de simulações anuais desenvolvida pelo DAYSIM (2016), (*advanced daylight simulation software*). O método utilizado para a medição dinâmica divide o céu em 145 partes, e calcula cada uma dessas partes por rastreamento, relacionando cada iluminância provida de uma das divisões do céu para um ponto dentro do espaço.

Figura 26 – Organograma do algoritmo que permite a composição e avaliação dos elementos de fachada



Fonte: Os autores.

Figura 27 – Ambiente paramétrico desenvolvido com o plug-in Grasshopper no Software Rhinoceros 3D



Fonte: Os autores.

Simulações dinâmicas

Neste contexto, foram analisadas diferentes métricas lumínicas por meio do DIVA (*Design Iterate Validate Adapt*), um *plug-in* do Grasshopper que realiza as simulações de radiação solar, termo-energéticas e de iluminação natural. Foram mensuradas três métricas a

partir do uso desta aplicação, o *Useful Daylight Illuminance*, (UDI), o *sDA* (*spacial daylight autonomy*) e o *ASE* (*annual sunlight exposure*).

A primeira medida dinâmica simulada no algoritmo proposto, o *Useful Daylight Illuminance*, (UDI), verifica se os níveis de iluminação estão na faixa entre 100 lux e

2000 lux. As medições do UDI geram como resultado a porcentagem do espaço que apresenta níveis baixos de iluminação (menores que 100 lux), a porcentagem que apresenta níveis ideais (entre 200 lux e 2000 lux) e a porcentagem que apresenta níveis acima do necessário (maiores de 2000 lux), o que pode gerar incômodo para alguns usuários. (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006; MARDALJEVIC, 2015).

A segunda métrica analisada é descrita pela IES (2012), o SDA (*spacial daylight autonomy*), ou espaço autônomo da luz natural. É uma métrica na qual se avalia o piso do local simulado. Nela se discrimina a porcentagem e os locais do espaço onde é ultrapassada a média de 300 lux em pelo menos 50% das horas do dia, durante o período de um ano. As condições de iluminação externa para esta medição são baseadas no TMY (*typical meteorological year*). Sua avaliação é feita durante 10 horas por dia em um período que compreende das oito horas da manhã às seis horas da tarde, totalizando 3650 horas de análise.

A terceira métrica dinâmica analisada é o ASE (*anual sunlight exposure*), ou exposição anual à luz solar. Esta métrica busca descobrir possíveis locais que podem gerar desconforto devido à incidência direta da luz solar, é definida pela porcentagem da área do ambiente onde os níveis de iluminância da luz solar excedem um limite específico de horas por ano. Esse limite cnsite em 1000 lux para mais de 250 horas por ano, considerando as mesmas 3650 horas analisadas do sDA. Os índices de aceitação do ASE são descritos nos painéis de discussão do relatório da IES (2012), em que ambientes que ultrapassam a porcentagem de 10% de sua área analisada são considerados *unsatisfactory* (insatisfatório). Espaços onde os índices são inferiores a 7% são descritos como *neutral* (neutros) ou *nominally accepted* (normalmente aceitos). E ambientes onde o índice é inferior a 3% são mencionados como *accepted* (aceitáveis). Entretanto estes índices ainda estão em discussão.

Para as simulações dinâmicas, foi utilizado o arquivo climático BRA_FLORIANOPOLIS838990_SWERA. Esse arquivo é referente à cidade de Florianópolis, SC, Brasil. Cada composição foi avaliada duas vezes em posicionamentos diferentes. Na primeira inseriam-se os elementos na fachada voltados para a face Norte do modelo, e na segunda se ajustava para a face Sul, sendo inexistente um modelo tridimensional de entorno para as simulações, e considerando somente a iluminação natural, sem a interferência de áreas sombreadas ou outras barreiras.

Com a definição de todos os modelos de painéis e do ambiente paramétrico a ser simulado iniciaram-se as simulações dinâmicas, sendo feitas duas simulações por elemento. No total foram rodadas 100 simulações, dez para cada tipo de geometria fractal, avaliando-se os índices

SDA, UDI e ASE, os resultados gráficos das simulações estão representados pela Figura 28.

Análise dos resultados

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 e para a fachada Sul (Figuras 29 e 30). O segundo agrupa todos os tipos de fractais e avalia os seus resultados conforme a iteração e orientação solar, Norte ou Sul (Figura 31). O último agrupa diferentes fractais e avalia somente uma métrica nas quatro iterações simuladas (Figura 32).

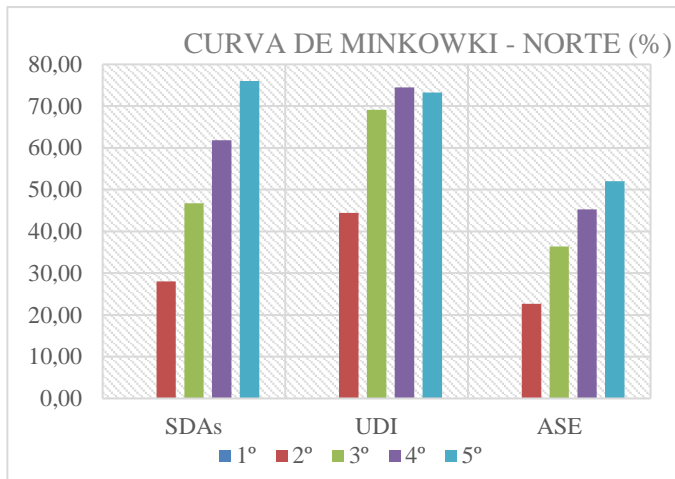
Os resultados das simulações foram conclusivos para interpretar o comportamento lumínico referente a cada tipo de fractal em determinada iteração. Estes resultados, demonstraram as diferentes potencialidades e deficiências dos elementos de fachada com características fractais, e permitiram observar que além de ampliar a gama de resoluções formais e de *designs*, tais elementos ainda podem contribuir para a admissão seletiva da luz natural. É perceptível que a maioria dos elementos apresentam perspectivas positivas a respeito da seleção da luz natural, por meio da característica das iterações infinitas, que permitem que a cada iteração uma diferente quantidade de luz natural penetre no ambiente. Contudo, três elementos demonstraram deficiências desta característica, pois a cada iteração os resultados demonstraram pouca mudança nos níveis de iluminação que adentravam no ambiente, e muitas vezes acusavam até um excesso de luz, representado pelo UDI.

Figura 28 –Exemplo de resultado simulado pelo plug-in DIVA

1027	915	1281	1851	1789	1127	1832	1408	1828	1108	1735	1844	1344	819	1867
836	1329	1409	1295	1653	1763	1766	1408	1766	1785	1670	1302	1408	1430	909
869	779	918	1143	1335	995	1082	1562	1083	906	1372	1180	619	797	950
1044	872	1238	1298	1547	1344	1483	1296	1487	1335	1381	1278	1272	981	1167
480	852	256	886	479	833	543	890	595	903	548	947	341	721	488
860	454	918	650	746	984	984	582	859	1033	746	812	991	580	736
239	454	322	472	431	434	167	738	192	562	483	482	443	542	286
294	65	0	345	436	0	916	381	539	0	470	435	0	117	350
433	347	232	495	443	573	683	381	574	574	470	391	390	382	470
258	65	187	142	167	167	192	0	167	192	192	175	192	117	348
142	142	0	142	142	0	0	0	0	0	175	175	0	175	175
142	0	142	142	0	0	0	0	0	0	0	175	175	0	175
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

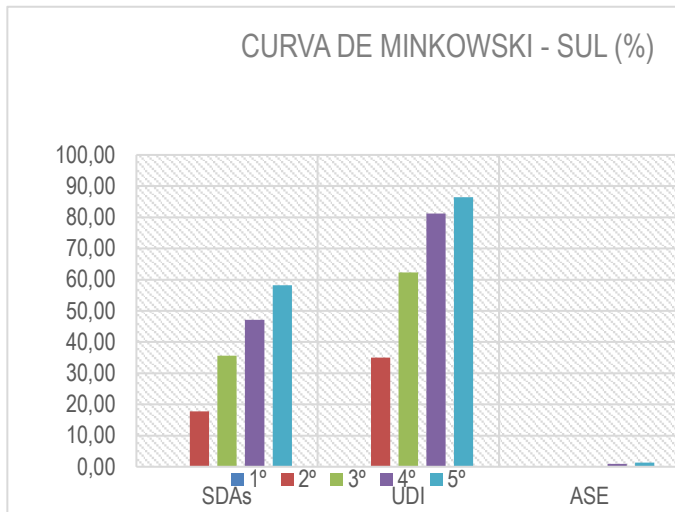
Fonte: Os autores.

Figura 29 – Gráfico com os diferentes resultados para cada iteração para a curva de Minkowski



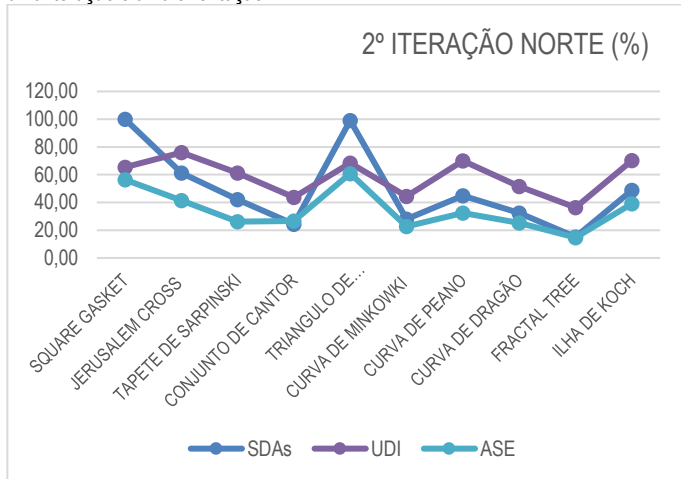
Fonte: Os autores.

Figura 30 – Gráfico com os diferentes resultados para cada iteração para a curva de Minkowski



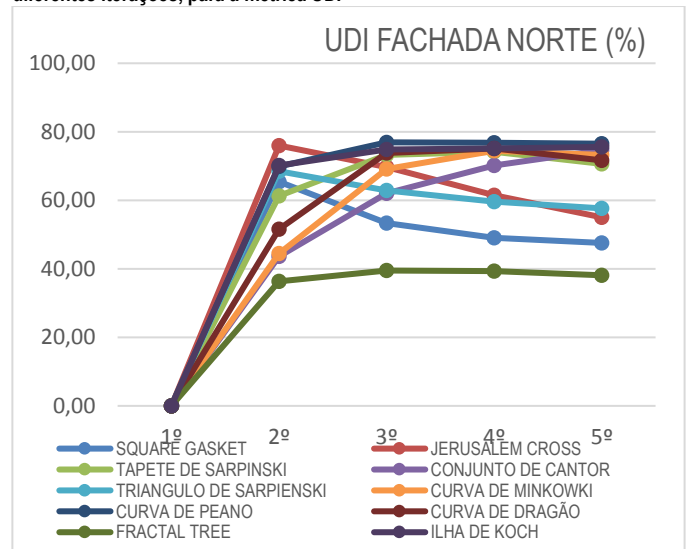
Fonte: Os autores.

Figura 31 – Todos os tipos de painéis com características fractais para somente uma iteração e uma orientação



Fonte: Os autores.

Figura 32 – Gráfico com os resultados gerais dos elementos de fachada e suas diferentes iterações, para a métrica UDI

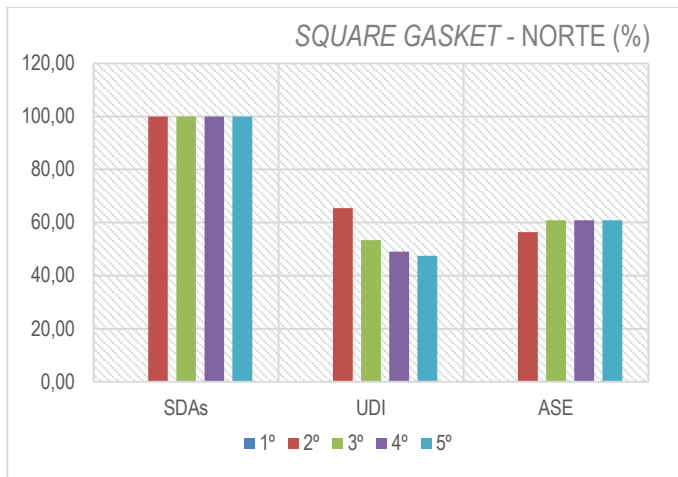


Fonte: Os autores.

As simulações que apresentaram maior representatividade foram as voltadas para a fachada Norte, pois um dos índices medidos o ASE, quando analisado para a fachada Sul, não apresentou resultados significativos, devido à baixa incidência de radiação nessa fachada. Já na fachada Norte, é significativa a quantidade de radiação recebida proporcionando resultados mais expressivos que os coletados nas simulações da fachada Sul. Entretanto, como o modelo desenvolvido para o estudo permite a escolha da fachada e do arquivo climático a ser analisado, há possibilidade destes serem avaliados para diferentes locais, e voltados para diferentes orientações solares, proporcionando interpretações diferenciadas dos resultados encontrados nos testes deste trabalho.

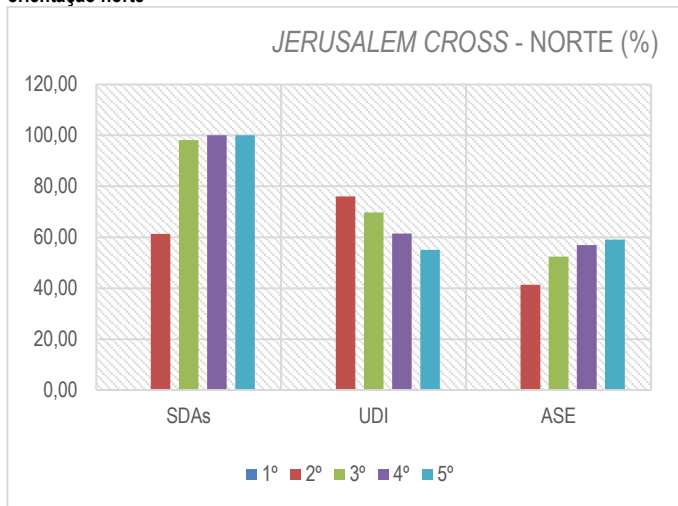
Alguns resultados demonstraram constância na quantidade de luz dentro do ambiente, e até, muitas vezes, excesso de luz, que pode ser interpretado pela diminuição dos índices de UDI. Isso foi ocasionado pois, a partir da segunda iteração o painel já apresentava uma parte considerável de sua área total subtraída por suas regras de composição. Os painéis que apresentaram essa característica foram os que utilizaram como regra os fractais: Square Gasket, (Figura 33), Jerusalem Cross, (Figura 34) e Triângulo de Sierpinski, (Figura 35). Outro elemento que apresentou um resultado de pouca expressão foi o *Fractal Tree* (Figura 36), pois, ao contrário dos painéis mencionados anteriormente, sua pouca diferenciação da área subtraída entre suas iterações teve o efeito contrário, ocasionando uma adição insignificante de luz no ambiente analisado.

Figura 33 – Gráfico com os resultados do Square Gasket, simulados para a orientação norte



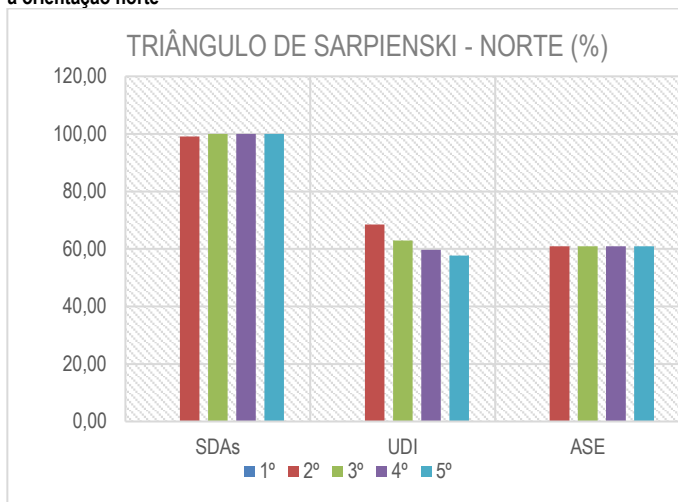
Fonte: Os autores.

Figura 34 – Gráfico com os resultados do *Jerusalém Cross*, simulados para a orientação norte



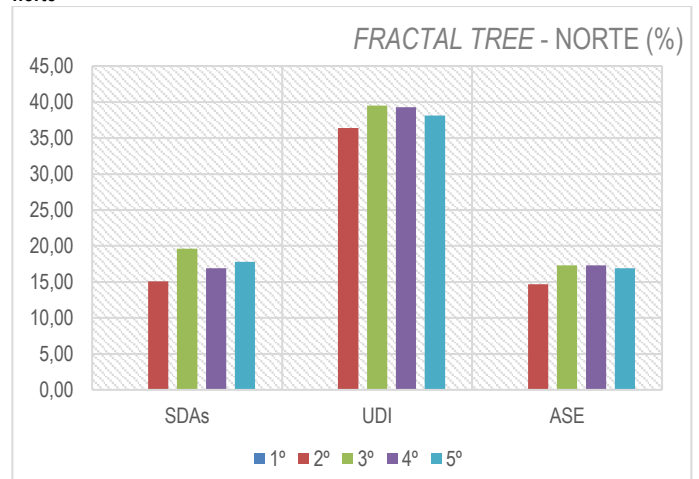
Fonte: Os autores.

Figura 35 – Gráfico com os resultados do Triângulo de Sierpinski, simulados para a orientação norte



Fonte: Os autores.

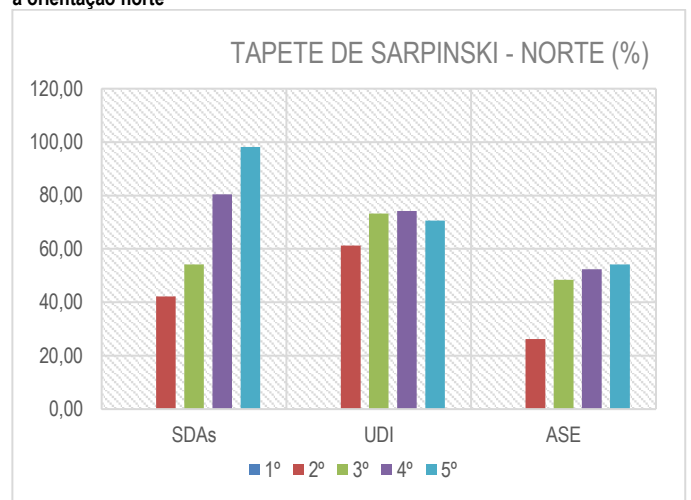
Figura 36 – Gráfico com os resultados do Fractal Tree, simulados para a orientação norte



Fonte: Os autores.

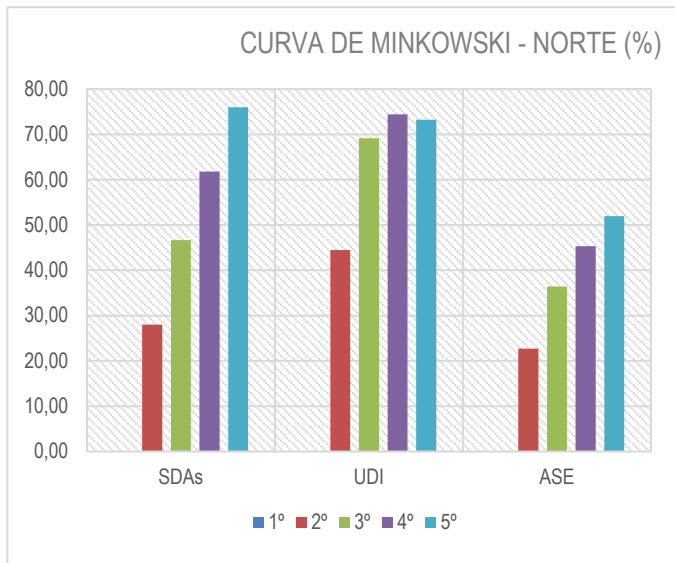
Ao observar os elementos de fachada que apresentaram melhor desempenho luminoso pode-se constatar que, além das potencialidades já conhecidas das características fractais, como a ampliação de composições formais e a redução do stress, o uso das regras que compõem esses elementos pode aprimorar a utilização da luz natural. Alguns deles, mesmo nas suas composições individuais, demonstraram resultados positivos através da capacidade de seleção da luz natural em proporções diferenciadas para cada iteração. Os elementos desenvolvidos com as regras fractais, Tapete de Sierpinski (Figura 37), Curva de Minkowski (Figura 38), Curva de Dragão (Figura 39) e Conjunto de Cantor (Figura 40), demonstraram possuir diferentes filtragens da luz para cada iteração. O comparativo geral entre os painéis fractais pode ser observado a partir das Figuras 32, 41 e 42.

Figura 37 – Gráfico com os resultados do Tapete de Sierpinski, simulados para a orientação norte



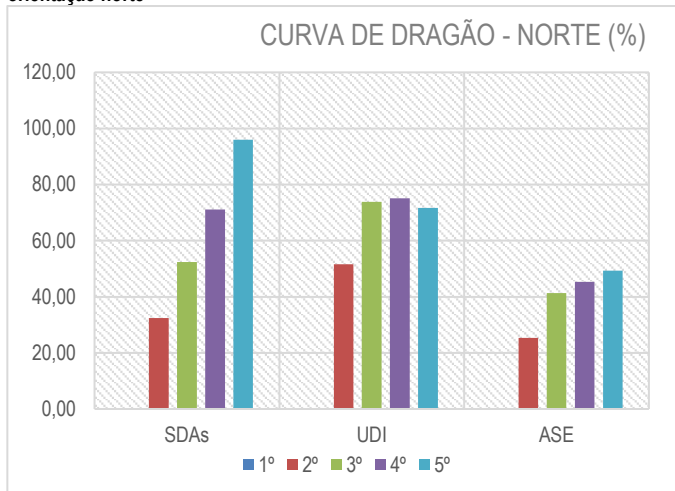
Fonte: Os autores.

Figura 38 – Gráfico com os resultados do Curva de Minkowski, simulados para a orientação norte



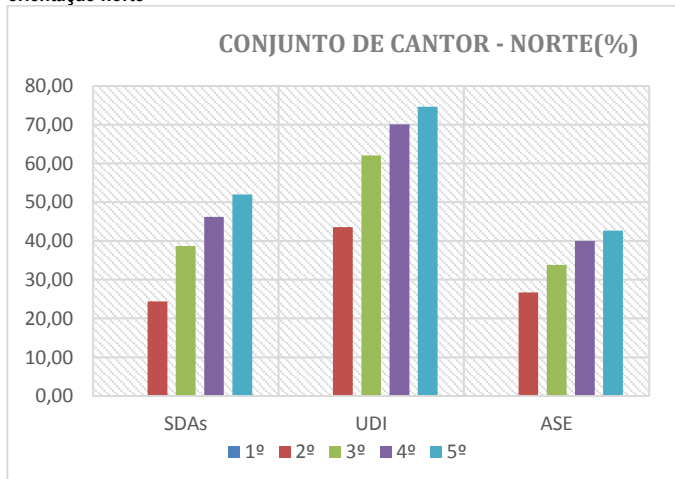
Fonte: Os autores.

Figura 39 – Gráfico com os resultados do Curva de Dragão, simulados para a orientação norte



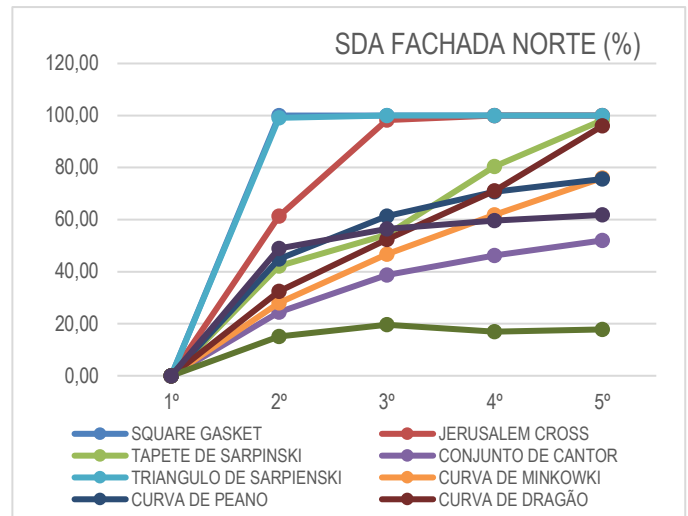
Fonte: Os autores.

Figura 40 – Gráfico com os resultados do Conjunto de Cantor, simulados para a orientação norte



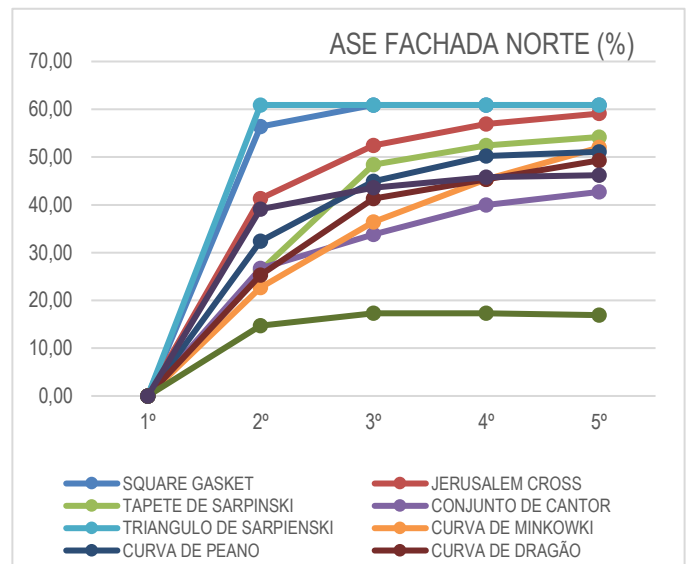
Fonte: Os autores.

Figura 41 – Gráfico com os resultados gerais dos elementos de fachada e suas diferentes iterações, para a métrica SDA



Fonte: Os autores.

Figura 42 – Gráfico com os resultados gerais dos elementos de fachada e suas diferentes iterações, para a métrica ASE



Fonte: Os autores.

Considerações finais

As avaliações negativas a respeito de alguns dos elementos podem ser contornadas ao modificar-se alguns parâmetros individuais, limitando ou aumentando a área a ser subtraída na sua confecção dentro de seu algoritmo. A avaliação individual não é conclusiva de modo que cada elemento pode ser avaliado para diferentes usos, *designs* ou efeitos lumínicos, e pode apresentar diferentes resultados para locações distintas.

As conclusões a respeito das métricas lumínicas de cada tipo de painel podem hierarquizá-los para que cada um tenha um uso direcionado para determinada situação, onde se deseja mais, menos ou um singular controle dos índices

lumínicos. A utilização dos elementos de fachada como um instrumento para o controle e a distribuição da luz, é mais um complemento para justificar sua utilização, pois além dos ganhos lumínicos os projetistas, *designers* e

engenheiros, podem utilizar esses elementos como um complemento para o leque de opções de desenho a serem utilizados em seus projetos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao programa de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), responsável por fornecer o auxílio necessário para o desenvolvimento deste trabalho, e a Universidade Federal de Santa Catarina, por me propiciar o ambiente e os demais recursos intelectuais imprescindíveis para que o presente trabalho fosse concluído.

Referências

- ASAYAMA, S.; MAE, T. Fractal Structures based on the Geometry of nature. *In*: ANNUAL SYMPOSIUM OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 2015, Tokio. **Proceeding...** Madrid: IASS, abril de 2015.
- ASAYAMA, S.; MAE, T. Fractal Truss Structure and Automatic Form Generation Using Iterated Function System. *In*: BIANUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR COMPUTING IN CIVIL AND BUILDING ENGINEERING, 2004, Weimar. **Proceeding...** Weimar: ICCCB, 2004.
- ASSIS, Thiago Albuquerque de et al. Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 2304.1-2304.10, 2008. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172008000200005>.
- BAIER, T.; SEDREZ, M. Geometria Fractal e Arquitetura. *In*: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA, 8., 2013, Montevideo. **Anais...** Montevideo: SEMUR, 2004. p.7349- 7355, 2013.
- BOYCE, P. R. Illuminance Selection Based on Performance – and Other Fairy Stories. **Journal of the Illuminating Engineering Society**, Nova York, v. 25, n.2, p.41-49, 1996. doi:<https://doi.org/10.1080/00994480.1996.10748146>
- CARTANA, R. P.; PEREIRA, F. O. R.; BERTÉ, E. J. Avaliação de desempenho térmico e lumínico de elementos de controle solar projetados através de modelagem paramétrica. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUIDO, 16., São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, setembro de 2016. p. 604-619.
- CELANI, G.; VAZ, C. E. V. CAD Scripting and Visual Programming Languages for Implementing Computational Design Concepts: A Comparison from a Pedagogical Point of View. **International Journal of Architectural Computing**, v. 10, n. 1, p.121-137, 2012. doi:<https://doi.org/10.1260/1478-0771.10.1.121>
- CHING, F.. **Arquitetura, forma, espaço e ordem**. 2. ed. São Paulo: Editora Martins Fontes, 1998.
- CUNHA, E. G. Mitos e verdades sobre o brise-soleil: Da estética à eficiência energética. **Arquiteturarevista**, v. 7, n. 1, p. 73-80, 2011.
- IES - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. Approved method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). **The Daylight Metrics Committee**. 2012.
- HARRIS, J.. Integrated Function Systems and Organic Architecture from Wright to Mondrian. **Nexus Network Journal**, v. 9, n. 1, p. 93-101, 2007. doi:<https://doi.org/10.1007/s00004-006-0031-9>
- HUTCHINSON, J. E. Fractals and self similarity. **Indiana University Mathematics Journal**, v. 30, n. 1, p. 713-747, 1981. <http://www.jstor.org/stable/24893080>
- HYÖTYNIEMI, Heikki (ed.). **Complex Systems: Science on the Edge of Chaos** – Collected papers of the Spring 2003 postgraduate seminar. Helsinki University of Technology, Control Engineering Laboratory, Report 145, 2004. p. 193.
- JOYE, Y. Fractal Architecture Could Be Good for You. **Nexus Network Journal**, v. 9, n. 1, p. 311–320, 2007. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8699-3_9

- LORENZ, W. E. Fractal Geometry of Architecture – Implementation of the Box-Counting Method in a CAD-Softwar. *In: ANNUAL CONFERENCE OF EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE*, 27., 2009, Istanbul. **Proceeding...** Istanbul: eCAADe, set. 2009. p. 697-704, 2009.
- MANDELBROT, B. B. **The Fractal Geometry of Nature**. W. H. Editora: Freeman and Company, Nova Iorque. 1977.
- MARDALJEVIC, J. Climate-Based Daylight Modeling and Its Discontents. *In: TECHNICAL SYMPOSIUM OF THE CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS*, 2015, London. **Proceeding...** London: CISBE, set. 2015. p. 1-12.
- MCNEIL, A.; LEE, E. A validation of the Radiance three-phase simulation method for modelling annual daylight performance of optically complex fenestration systems. **Journal of Building Performance Simulation**, n. 1, v. 6, p.24-37, jan. 2013. Informa UK Limited. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2012.671852>.
- REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. **LEUKOS**, v. 3, n. 1, p. 7-31, 2006. doi:<https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001>
- RIAM, M. I.; ASAYAMA, S. Computational Design of a nature-inspired architecture structural using the concepts of self-similar and random fractals. **Automation in Construction**, v. 66, p. 43–58, 2016. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.03.010>
- RUMIEZ, Agnieszka. Fractal Architecture. **Architecture and Urban Planning**, [s.l.], v. 8, p.45-58, 19 dez. 2013. Riga Technical University. doi:<http://dx.doi.org/10.7250/aup.2013.019>.
- SAMPER, A.; HERRERA, B. A Study of the Roughness of Gothic Rose Windows. **Nexus Network Journal**, [s.l.], v. 18, n. 2, p.397-417, 8 ago. 2015. doi:<https://doi.org/10.1007/s00004-015-0264-6>
- SEDREZ, Maycon; MENEGHEL, Rafael de Moraes. Projeto paramétrico com fractais no detalhamento de uma fachada. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 4, n. 2, p. 22-29, dez. 2013.
- SEDREZ, Maycon; MENEGHEL, Rafael de Moraes. Projeto paramétrico com fractais no detalhamento de uma fachada. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 4, n. 2, p. 22-29, dez. 2013. ISSN 1980-6809. doi:<https://doi.org/10.20396/parc.v4i2.8634548>.
- SPEHAR, B. et al. Universal aesthetic of fractals. **Computers & Graphics**, v. 27, n. 5, p. 813-820, 2003. doi:[https://doi.org/10.1016/S0097-8493\(03\)00154-7](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(03)00154-7)
- TAYLOR, R. Reduction of Physiological Stress Using Fractal Art and Architecture. **The MIT Press**, v. 39, n. 3, p. 245-251, jun de 2006.
- TRACADA, E. Biophilic Urban Developments Following Dynamic Flows of Three Shaped Architectures. **International Journal of Heat and Technology**, v. 34, Special Issue 1, p.S161-S166, 2016. http://ieta.org/sites/default/files/Journals/IJHT/34.Sp1_21.pdf
- SALINGAROS, N. A. The sensory value of ornament. **Communication & Cognition**. v. 36, n. 3-4, p. 331-351, 2006.
- SALINGAROS, N. A. Fractal Architecture Reduce Physiological Stress. **Journal of Biourbanism**, v. 2, p. 11–26, 2012/2013. Disponível em: < https://journalofbiourbanism.files.wordpress.com/2017/12/jbu_vol2_issue2_2012.pdf>. Acesso em: 11.05.2018
- WAIHRICH, L. P. et al. Pesquisa de padrões e suas aplicações em arquitetura e urbanismo: ênfase em geometria fractal. **Mecânica Computacional**, Buenos Aires, v. 29, n. 63, p.6341-6359, 2010. Disponível em: < <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/3453>>. Acesso em: 11.05.2018
- WISE, J. A.; ROSENBERG, E. **The effects of interior treatments on performance stress in three types of mental tasks**. Grand Rapids: Grand Valley State University, 1988. (CIFR Technical Respor No. 002-02-1988).
- ZUHAIB, S. et al. Generic assessment of optimization methods for performance based design of retrofitted building façades for nearly zero-energy buildings. *In: CONFERENCE ON ADVANCED BUILDING SKINS*, 11., 2016, Bern. **Proceeding...** Bern: Advanced Building Skins GmbH, 2016.

¹ **Pedro Oscar Pizzetti Mariano**

Mestrando. Especialista. Endereço Postal: R. Monteiro Lobato, 150, Criciúma, SC, Brasil, 88811-020

² **Alice Theresinha Cybis Pereira**

PhD. Professora de pós-graduação no Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina.
Endereço Postal: UFSC - Campus Reitor João David Ferreira Lima, s/n - Trindade, Florianópolis - SC, 88040-900

³ **Carlos Verzola Vaz**

Doutor. Professor no Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina. Endereço Postal:
UFSC -Campus Reitor João David Ferreira Lima, s/n - Trindade, Florianópolis - SC, 88040-900