

# ORGANIZAÇÃO COMPOSITIVA E LUMÍNICA DE UMA FACHADA FRACTAL: DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO

ARTIGO

## Compositive and Luminic Organization of a Fractal Facade: Development and Evaluation

Pedro Oscar Pizzetti Mariano<sup>1</sup> e Alice Theresinha Cybis Pereira<sup>1</sup>

**RESUMO:** Este trabalho descreve o desenvolvimento e avaliação compositiva de um processo de projeto paramétrico que permite organizar elementos de fachada, com características da geometria fractal, conforme as necessidades do partido arquitetônico ou por meio do conseqüente comportamento da luz natural diurna. Para isso, elementos de proteção baseados em fractais lineares foram criados, e por intermédio desses elementos é possível formar e controlar arranjos compositivos conforme a radiação solar incidente sobre fachada. Os resultados desses arranjos são avaliados de modo quantitativo através de simulações dinâmicas da luz natural, e de modo qualitativo por intermédio de modelos renderizados e de uma maquete física, construída com o auxílio de uma cortadora a laser. Para se desenvolver o processo paramétrico, uma sequência de ações foi elaborada dentro de um “software” de programação visual, sendo os principais módulos: a criação de um ambiente urbano; a formação de um elemento de fachada; e componentes de avaliação para o processo. Como conclusão foi possível identificar que os resultados e meios de avaliação disponibilizados pelo processo paramétrico possibilitam ampliar a tomada de decisão do projetista, podendo hierarquizar suas escolhas. Essas decisões ainda podem ser potencializadas com o auxílio de maquetes físicas, pois possibilitam identificar características pontuais que podem alterar as definições compositivas já identificadas em análises quantitativas e visualizações bidimensionais.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

**PALAVRAS-CHAVE:** Geometria fractal; Elementos de fachada; Processo paramétrico; Decisões de projeto.

**ABSTRACT:** This work describes the development and compositional evaluation of a parametric design process that allows to organize facade elements, with characteristics of fractal geometry, according to the needs of the architectural party or through the consequent behavior of daylight. For this, protection elements based on linear fractals were created, and through these elements it is possible to form and control compositional arrangements according to the solar radiation on the facade. The results of these arrangements are evaluated in a quantitative way through dynamic simulations of natural light, and in a qualitative way through rendered models and a physical model, built with the aid of a laser cutter. In order to develop the parametric process, a sequence of actions was developed within a visual programming software, the main modules being: the creation of an urban environment; the formation of a facade element; and evaluation components for the process. As a conclusion, it was possible to identify that the results and means of evaluation made available by the parametric process make it possible to expand the designer's decision making, being able to prioritize his choices. These decisions can still be enhanced with the help of physical models, as they make it possible to identify specific features that can alter the compositional definitions already identified in quantitative analyzes and two-dimensional visualizations.

**KEYWORDS:** Fractal geometry; Facade elements; Parametric process; Project decisions.

### How to cite this article:

MARIANO, P. O. P.; PEREIRA, A. T. C. Organização compositiva e lumínica de uma fachada fractal: desenvolvimento e avaliação. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v.16, n.1, p.9-23, jan.2021. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v16i1.164900>

**Fonte de financiamento:**

CAPES

**Conflito de interesse:**

Declara não haver

**Submetido em:** 09/12/2019

**Aceito em:** 14/07/2020

[Disponível online em Dezembro de 2020]



## INTRODUÇÃO

O emprego de tecnologias no campo da construção, projeto e design tem influenciado o modo de se conceber e executar projetos. Para Barrios (2006) e Nardelli (2007), com o desenvolvimento do “*Computer Aided Design*” (CAD) e o “*Computer Aided Architecture Design*” (CAAD), processos de fabricação digital, “*Building Information Modeling*” (BIM), parametrização, processos generativos e algoritmos genéticos, arquitetos vêm ampliando e explorando as potencialidades da utilização de ferramentas provenientes de suportes digitais, tornando as variações e as mudanças decorrentes do processo de criação menos trabalhosas. Riam e Asayama (2016) comentam que a utilização de ferramentas, algoritmos e métodos computacionais acabam influenciando nas etapas de projeto, possibilitando a inserção de formas complexas, em conceitos e partidos, que buscam se assemelhar morfologicamente a fenômenos presentes na natureza.

O uso das características fractais em elementos de fachada pode contribuir como uma solução para o design formal da composição do projeto. Programas que auxiliam o desenvolvimento de modelos paramétricos permitem que elementos de controle de insolação, por exemplo, sejam alterados e pré visualizados constantemente, fazendo com que a utilização de “*brise-soleil*”, normalmente configurados como estruturas rígidas e lineares, possam utilizar geometrias complexas com novas configurações, materiais e tecnologias, normalmente configurados como estruturas rígidas e lineares, possam utilizar geometrias complexas com novas configurações, materiais e tecnologias. Autores como Cunha (2011), Cartana, Pereira e Berte (2016) corroboram a ideia que estes elementos dinamizam as fachadas e contribuem para a valorização da edificação.

Buscando compreender a aplicação da geometria fractal, o presente trabalho, que faz parte de uma dissertação de mestrado, interpreta os mecanismos de criação, composição e avaliação, através de simulação lumínica, de elementos de fachada, utilizando programas de programação visual para a reprodução de padrões complexos. Outros trabalhos já buscaram identificar processos e resultados semelhantes, como Sedrez e Meneghel (2013), Sedrez, Meneghel e Celani (2014) e Cartana (2018). Entretanto não desenvolvem diferentes elementos de fachada baseados em regras de fractais lineares, que em conjunto, possibilitam criar inúmeras composições paramétricas, disponibilizando indicadores de desempenho do comportamento interno da luz natural. O artigo também se diferencia por não buscar encontrar a melhor solução lumínica natural, mas sim por encontrar um processo de projeto que possibilite identificar um conjunto de soluções, por meio de diferentes composições, que possam ser compatíveis também com as atribuições formais que o projetista almeja.

O tema foi abordado com o intuito de estudar as possíveis etapas pertinentes à composição e à modelagem destes elementos de controle da admissão da luz natural através de um recurso compositivo singular que permite refinar a composição da fachada em suas escalas menores. O artigo também busca descrever, de forma aprofundada um processo que utilize da geometria fractal e seu uso no aprimoramento da programação visual. Como resultado criou-se um processo paramétrico que permitiu o desenvolvimento de composições de elementos de fachada com características da geometria fractal, e a avaliação e a hierarquização das diferentes premissas para a continuidade do projeto.

Para a criação deste processo, diferentes etapas foram consolidadas. Iniciou-se por uma revisão bibliográfica, com o objetivo de refinar conhecimentos pertinentes ao tema. Na sequência, construiu-se um processo paramétrico, dentro de uma plataforma de linguagem de programação visual, que permite modelar (com restrições) um ambiente virtual urbano, recriar uma construção passível de modificações, e criar elementos de fachada com características da geometria fractal linear. Por fim, os resultados compositivos dos elementos de fachada foram avaliados por meio de simulações computadorizadas e pela prototipagem de uma maquete

física. Esta maquete, por sua vez, possibilitou uma avaliação do resultado da composição da fachada formal da construção e de seu comportamento lumínico através de um indicador.

## CORPO TEÓRICO

O corpo teórico desta pesquisa concentra-se nos procedimentos e informações necessárias para o entendimento das principais partes estruturais do assunto. Estes trabalhos resultaram na compilação de um corpo teórico dividido em quatro partes, sendo elas: as características da geometria fractal; e sua utilização no campo da arquitetura

### A geometria fractal

A utilização de ornamentos e composições, inspiradas em elementos naturais, é algo evidente no desenvolvimento de projetos arquitetônicos durante a história da humanidade. Estes padrões podem ser observados nas colunas egípcias, ordens gregas, detalhes estruturais e decorativos de catedrais e em diferentes localidades e períodos históricos. A apropriação dos padrões naturais em elementos arquitetônicos se deve ao interesse humano em seguir padrões, como a fórmula do ouro e as medidas humanas (RUMIEZ, 2013).

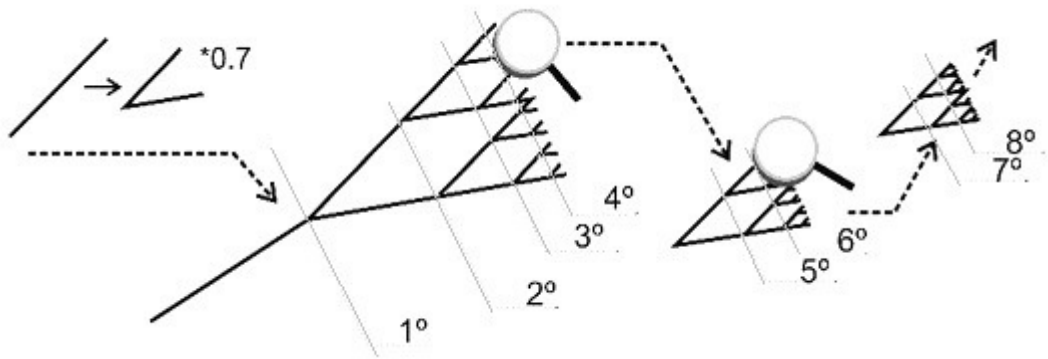
Para Venturi (1966), as ciências que estudam os padrões complexos definiram regras para desordens complexas. Hyötyniemi (2004) descreve que a busca por descobrir novas interpretações das forças caóticas na natureza resulta em conhecimentos nas ciências complexas do caos, denominadas de Limite do Caos (*“edge of chaos”*), que objetivam descobrir como a desordem pode ter ordem.

Através dos estudos das ciências do Caos, descreveu-se uma geometria que se assemelha às utilizadas pelos padrões da natureza, derivadas dos padrões fractais. Tendo este termo citado pela primeira vez por Mandelbrot em 1977, utilizando o adjetivo do latim *“fractus”* e do verbo *“frangere”* que possuem o significado de quebra (BARNSTEY; HUTCHINSON; STENFLO, 2003; MANDELBROT, 1977).

Segundo Mandelbrot (1977), um fractal é uma estrutura que apresenta invariância independente da escala em que é observado, estando sempre atrelado a um mesmo padrão ou forma e mantendo a sua estrutura original idêntica, derivando de quatro principais características: autossimilaridade; complexidade infinita; irregularidade (rugosidade); e uma dimensão não inteira.

A autossimilaridade é uma característica identificada quando uma porção da figura ou um contorno é uma réplica de um conjunto inteiro em escalas menores ou maiores, podendo ser observada em alguns objetos naturais como os brócolis, a couve flor ou as folhas da samambaia, essa característica pode ser exemplificada pela figura 1. A complexidade infinita refere-se ao processo recursivo para a criação de um elemento, ou seja, as iterações capazes de criar um determinado elemento. O atributo da irregularidade é uma característica que implica na rugosidade e se refere às formas extremamente irregulares, interrompidas ou fragmentadas em escalas variadas. (MANDELBROT, 1977; ASSIS et al., 2008; WAIHRICH, 2010).

A última característica dos fractais descritas por Mandelbrot é a dimensão que o fractal possui. E podem ser analisados e descritos pela dimensão D, desde arvores e até mesmo galáxias. Diversos autores demonstraram esta contagem da dimensão D em seus projetos. (MANDELBROT, 1977; TRACADA 2016).



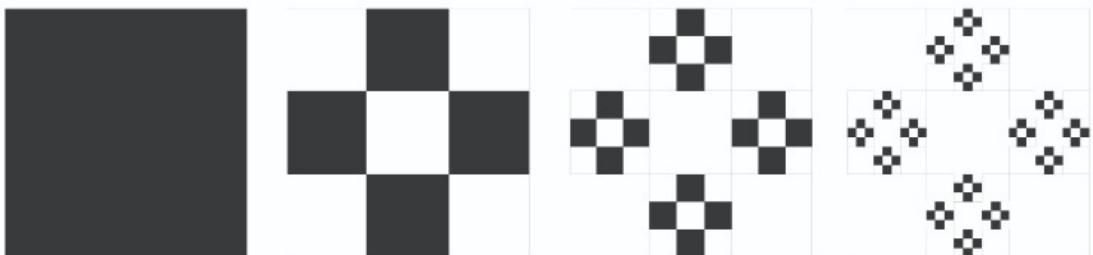
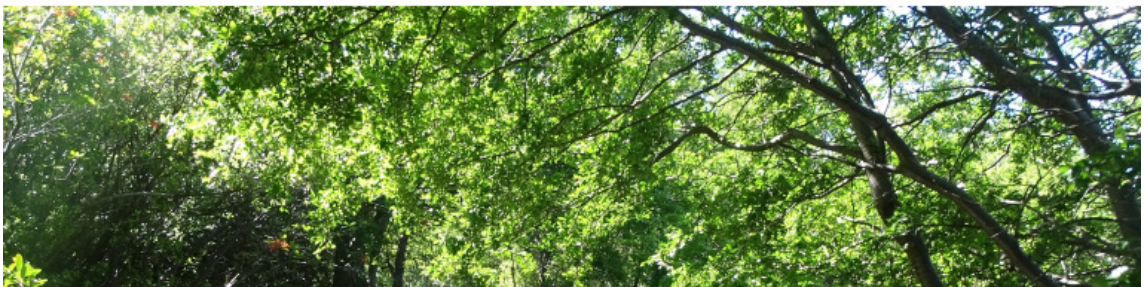
**Figura 1:** Exemplificação da autossimilaridade, que através de uma regra iterada compõe a formação de um padrão fractal linear.

**Fonte:** Os autores (2018).

### Fractais lineares e não lineares

Os fractais podem ser divididos em dois diferentes grupos: os fractais lineares e os 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. Os fractais não lineares, por sua vez, estão conectados diretamente com a Teoria do Caos e possuem resultados 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 (SEDREZ; PEREIRA 2009; SEDREZ, 2016).

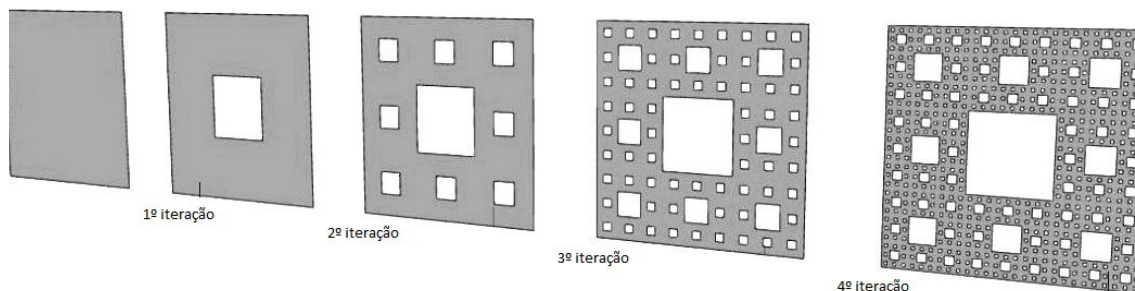
A figura 2 demonstra um comparativo entre a complexidade de dois padrões fractais, um não linear e outro linear.



**Figura 2:** Comparação entre fractais Não Lineares (com regras complexas, como estruturas da natureza) Lineares (com padrões bem definidos).

**Fonte:** Os autores (2018).

Para esta pesquisa optou-se pelo desenvolvimento de um fractal linear, o Tapete de Sierpinski. Desenvolvida pelo matemático Polonês, Waclaw Sierpinski (1882 – 1969), o tapete de Sierpinski pode ser considerado um padrão fractal de duas dimensões e suas interações acontecem por meio da remoção de um quadrado central de uma forma inicial dividida em uma matriz de 3 x 3. A superfície central é subtraída da forma, permanecendo somente as demais, e as novas iterações vão acontecendo repetidamente para cada superfície ainda presente. A figura 3 ilustra o padrão fractal. (RABAY, 2013).



**Figura 3:** Fractal linear Tapete de Sierpinski.

**Fonte:** Os autores (2018).

### A utilização da geometria fractal na arquitetura

A geometria fractal está presente em composições humanas há séculos, no campo da arquitetura ela pode ser encontrada na formação de plantas baixas, fachadas e ornamentos. A humanidade vem desenvolvendo construções, utensílios e obras de arte, utilizando as características dessa geometria complexa desde as primeiras civilizações (SALINGAROS, 2012).

A conexão entre o estudo das formas naturais e a arquitetura é utilizada por artistas, arquitetos e designers em conceitos e fundamentos. Esta ligação entre a pesquisa e aprofundamento das estruturas naturais é identificada em projetos e pensamentos de nomes como Frank Loyd Wright e Piet Mondrian. Esses profissionais apresentam padrões em suas obras a partir de conhecimento no campo do comportamento da natureza ou utilizando regras de padrões naturais (TAYLOR; MICOLICH; JONAS, 2002; HARRIS, 2007).

Em diversos períodos históricos, os fractais estão presentes na arquitetura, em muitos dos exemplos não são identificados no seu contexto geral, mas sim associados à ideia de formação ou em um volume específico do conjunto. Como exemplos na formatação das plantas baixas temos: as fortificações das vilas Ba-ili, no Zâmbia; no templo chinês de *Kaiyuan Si Pagoda's*; nas modulações na Palmer House em Michigan, EUA. Em uma escala tridimensional, a aplicação das características pode ser identificada em partes detalhadas ou em grandes escalas. Em aplicações tridimensionais têm-se exemplos como: a cúpula da catedral de Milão; o *Saced Stump* em Laos; construções e elementos góticos, como o *Castel del Monte*, no sul da Itália; nas obras do Russo de Malevich, denominadas *Architektoniki*; no Storey Haal em Melbourne. (JOYE, 2007; SAMPER; HERRERA, 2016; SALA, 2003).

Contudo, o primeiro projeto a utilizar regras e padrões fractais, baseados em conceitos existentes, foi a casa 11<sup>a</sup> (1978) projetada pelo arquiteto Peter Eisenman para a competição “*Venice Housing*”. Um outro projeto de Eisenman que utilizou de padrões fractais para o seu desenvolvimento foi o “*Moving Arrows, Eros and other Eros*” (1985), cujas características fractais presentes eram a descontinuidade, a recursividade e a autossimilaridade (OSTWALD, 2001).

## Ferramentas e software

O surgimento da fabricação digital na prática e ensino da arquitetura e urbanismo fez com que a utilização de programas paramétricos e generativos expandissem. Para Celani e Vaz (2012), a inserção de tecnologias ocorreu após a década de 1980, pois nas décadas que antecederam esse período a capacidade de hardware dos computadores era limitada. A baixa capacidade de processamento dos computadores comerciais impossibilitava a utilização de programas que permitissem a criação composições complexas, como regras de iteração. Mas, com o surgimento de novos computadores, com novos processadores, memória e a preços acessíveis, não só estas ferramentas começaram a expandir, mas também o modo como elas são operadas e suas diferentes possibilidades de uso.

Celani e Vaz (2012) descrevem que atualmente pode-se criar um código paramétrico e generativo a partir de programas que permitem uma interpretação visual da programação, “*visual programming languages*” (VPLs). As programações visuais são organizadas e desenvolvidas a partir de elementos gráficos já existentes, que são movimentados, ajustados e conectados. Os VPL's são organizados de modo visual, sendo ordenados por meio de caixas e fios, “*box-and-wire*” que se interligam.

O VPL escolhido para utilizar neste trabalho foi o plug-in Grasshopper, compatível com o programa de modelagem tridimensional Rhinoceros 3D. O plug-in possibilita uma programação denominada “*Explicit History*”, cuja a interface não necessita de profissionais especializados em “*script*” para desenvolver suas regras. No programa é possível adicionar inputs, outputs, parâmetros e outros componentes em diferentes locais e estágios (ERCAN; ELIAS-OZKAN, 2015).

Hernandez (2004) descreve que ferramentas paramétricas aliadas à prototipagem conseguem modificar o cenário projetual tradicional, o qual fazia uso de somente duas dimensões no espaço. A apropriação de ferramentas paramétricas permite a reconstrução de padrões naturais, a expansão e inovação dos tradicionais sistemas e métodos de projeto e construção, além da possibilidade de testá-los visualmente e através de simulações e recursos manuais. Fisher e Herr (2000) complementa este pensamento afirmando que os modelos desenvolvidos por ferramentas digitais podem ser testados fisicamente. Atualmente dispomos de ferramentas como a impressão 3D, e as realidades aumentada e virtual para compreendermos rapidamente os designs concebidos.

## MODELOS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do processo paramétrico buscou-se identificar um método passível de reproduzir as formas e padrões fractais lineares, e através delas arranjar composições. E para avaliar o desempenho lumínico desses arranjos foi necessário escolher um índice de desempenho que possibilita avaliar o comportamento da luz natural interna consequente da composição desenvolvida pelo processo.

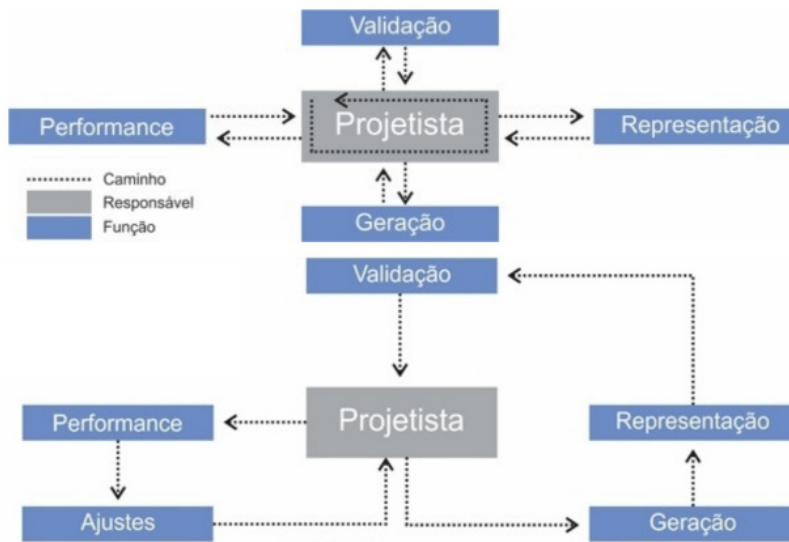
Para o desenvolvimento do processo paramétrico buscou-se identificar um método já existente que auxilie na confecção das etapas da pesquisa, consequentemente o *Performance Model* foi analisado, pois permite gerar um modelo que pode ser validado ou não, por uma sequência de ações e simulações. (SEDREZ; MENEGHEL; CELANI, 2013).

Dentro de alguns métodos estruturados para o design digital, no centro de seu controle é posto à figura ilustrativa do designer, controlando e autorizando as funções e etapas para que elas sigam um fluxo já estruturado. Tais passos podem ser identificados como: representação; geração; validação; e performance. A figura central do projetista entre essas ações caracteriza em determinadas funções, um link direto entre os processos, controlando a comunicação e repassando a função de um para outro. Caso a mudança

de etapas sempre passe pelo núcleo central (projetista) ela é atribuída a uma linha de projeto tradicional, cuja as ferramentas digitais são utilizadas unicamente como ferramentas de desenho e representação (*paper-based model*) (OXMAN, 2006; 2007).

Seguindo exemplos de trabalhos como o de Sedrez, Meneghel e Celani (2013) e Oxman (2008), a proposta do modelo paramétrico que se pretende utilizar na pesquisa segue uma modificação de um modelo já existente que gera e compõe diferentes partes do processo por meio de simulações e desempenhos, denominado “*performance model*”. Oxman (2006; 2007; 2008) descreve esse modelo como uma nova visão da inserção das simulações em processos de projeto, inseridos dentro de ferramentas computacionais como processos generativos, paramétricos e programas de simulação.

O modelo modificado do “*Performance Model*” acrescenta uma nova etapa de controle ao modelo proposto por Oxman (2006; 2007). No processo de simulação que gera o modelo, uma etapa de ajustes foi inserida anteriormente, de modo que alterações sejam feitas em uma composição inicial, para na sequência, novas simulações acontecerem. A figura 4 demonstra o modelo tradicional “*Paper Based Model*” e o modificado do “*Performance Model*” para a pesquisa.



**Figura 4:** Na sequência estão dois modelos descritos por Oxman (2006): o Paper-based model e o Performance model, e após o modelo ajustado para a pesquisa.

**Fonte:** Os autores (2018).

## Indicadores Lumínicos

O artigo tem o intuito de comunicar os resultados de uma pesquisa na qual se desenvolveu um modelo paramétrico que interpreta os mecanismos de criação, composição e avaliação de elementos de fachada com características da geometria fractal e a simulação dos resultados lumínicos naturais de sua composição. Não há o intuito de interpretar o conforto lumínico dos ocupantes.

Zuhaib (2015) comenta que o desenvolvimento de modelos de fachadas pode ser auxiliado por ferramentas computacionais que permitem associar a forma com: materiais, número de aberturas, ventilação, iluminação etc.

Para organização dos elementos de fachada, foi utilizada uma medição, por meio de uma simulação dinâmica da radiação que incide sobre a fachada

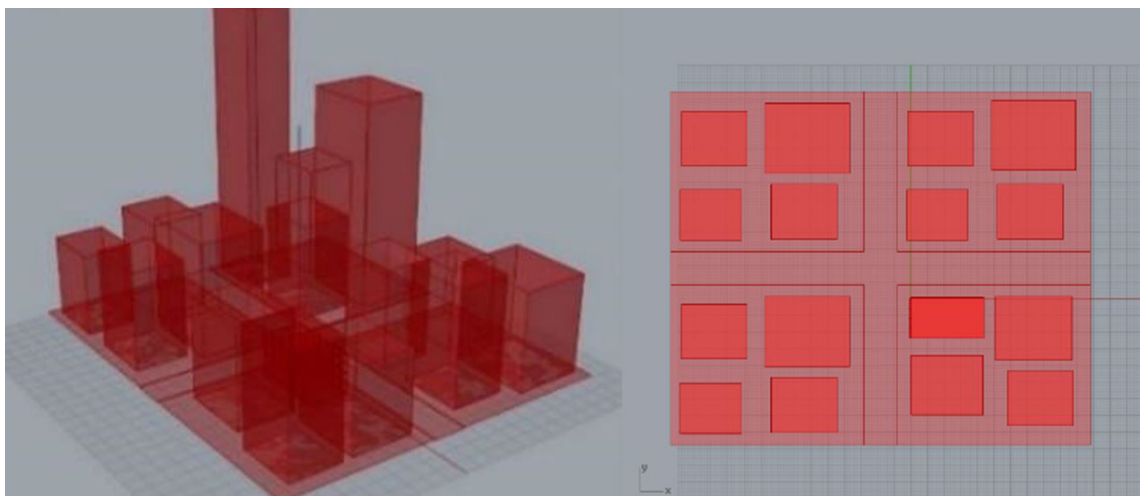
(em Kw/h), e com o resultado organizar os componentes de fachada. Para realizar as simulações do comportamento lumínico natural do ambiente interno, foi escolhido um índice lumínico, o “*Spacial daylight autonomy*” (sDA). A IES LM-83-12 (2013) descreve o sDA como uma simulação dinâmica que contabiliza a porcentagem do espaço físico (em um determinado plano) 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.

Para executar as simulações o programa utilizado é o plug-in DIVA, por ser compatível com a plataforma Rhinoceros 3D – 5 (Ambos os programas utilizados apresentam licenças estudiantis legais para seu uso). Este “*software*” foi escolhido pela facilidade em ser utilizado na interface de modelagem (FELLIPPE, 2016, CARTANA; PEREIRA; BARTE, 2016).

### Desenvolvimento do processo paramétrico

Com os principais assuntos e programas computacionais interpretados e aprofundados, iniciou-se o desenvolvimento do processo paramétrico. O processo completo é subdividido em cinco etapas: a construção de um entorno urbano cabível de modificações; a confecção de um elemento de fachada com regras da geometria fractal linear; a organização desses elementos de fachada em uma construção; uma etapa de avaliação por meio de simulações e renderizações; e verificação do resultado da composição através de uma maquete física.

A primeira ação de construção do processo é constituída de outras duas sub-etapas, o desenvolvimento de um cenário urbano paramétrico e a construção de uma edificação para receber os elementos de fachada. Inicialmente se avançou na modelagem de um ambiente urbano paramétrico que altere características, possibilitando que se assemelhe a áreas urbanas existentes. No modelo foram propostas quatro quadras parametricamente alteráveis, sendo possível modificar suas dimensões como largura e comprimento. Em cada uma delas pode-se acrescentar até quatro edifícios também parametrizados, estas construções podem ter sua forma alterada através de controladores que definem sua altura, escala em relação ao terreno e posição. Dentro desse ambiente, alguns parâmetros referentes à infraestrutura também podem ser modificados, como: largura das vias; largura dos passeios; altura do meio fio em relação a calçada; e Norte geográfico. A figura 5 apresenta um exemplo das diferentes modificações que podem ser feitas no entorno.



**Figura 5:** Exemplo da alteração de pavimentos e demais parâmetros no ambiente parametricamente alterável.

**Fonte:** Os autores (2018).



Após a criação do ambiente virtual parametrizado, desenvolveu-se uma edificação para receber os elementos de fachada. Buscou-se localizar essa edificação em uma esquina central, para que ela recebesse o sombreamento das demais edificações, recriando um cenário semelhante a um contexto real. Nessa construção, parametrizou-se diferentes medidas e estruturas como: largura; comprimento; estrutura; quantidade de painéis; pé direito; e número de pavimentos. A figura 6 apresenta o resultado da modelagem dessa construção já inserida no ambiente urbano digital, e, ao lado, os controladores que permitem suas alterações.

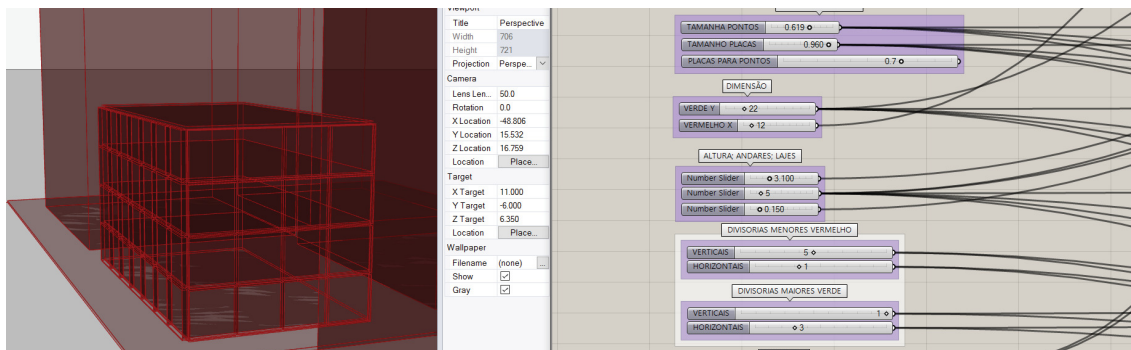


Figura 6: Modelo virtual da construção e uma amostra de seus controladores.

Fonte: Os autores (2018).

Com o ambiente do entorno e a construção já modeladas parametricamente, iniciou-se a segunda etapa do processo paramétrico, a construção dos elementos de fachada com características da geometria fractal linear. Para o desenvolvimento destes elementos, utilizou-se das características de um padrão fractal linear denominado tapete de Sierpinski, em suas três primeiras iterações, além de um elemento inicial sem quaisquer modificações. Para aplicar a regra desse padrão, um plug-in foi utilizado dentro da plataforma do Grasshopper, o Hoopsnake. Esse plug-in permite que uma determinada regra ou ação se repita diferentes vezes, por meio de iteração. A figura 7 apresenta uma amostra do resultado dos elementos de fachada iterados três vezes por meio das regras do tapete de Sierpinski e o seu painel inicial.

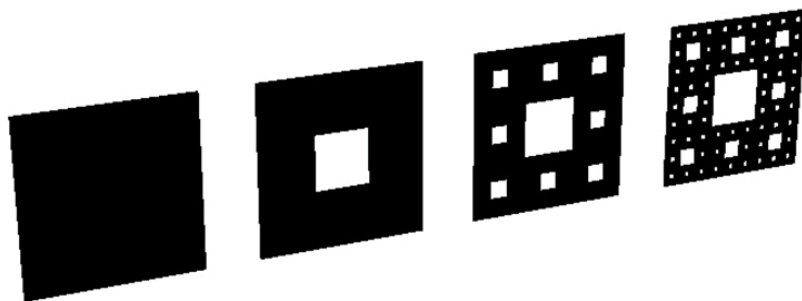


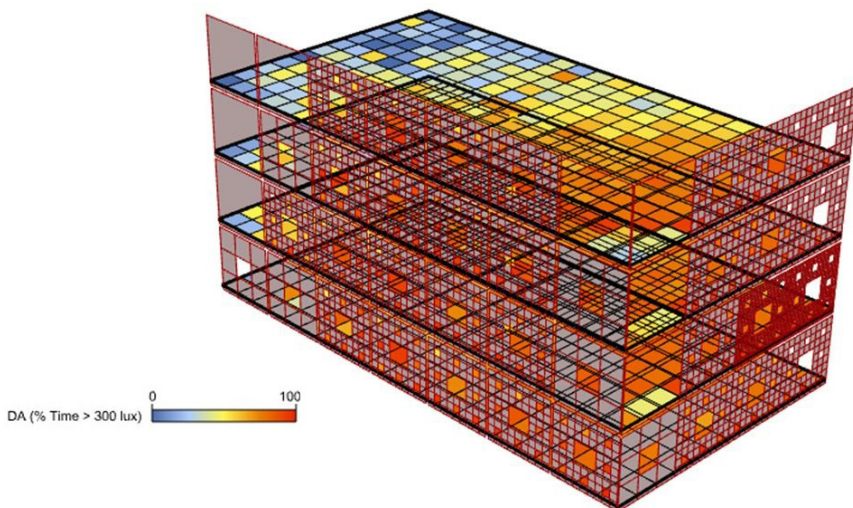
Figura 7: Modelo virtual da construção e as 4 iterações do triângulo de Sierpinski

Fonte: Os autores (2018).

Por meio destes três componentes parametrizados (entorno urbano, edifício e elementos de fachada) iniciou-se a construção da terceira parte da programação visual, referente a inserção e organização dos elementos de fachada na construção. Para tal feito optou-se por localá-los conforme a radiação incidente na fachada da edificação, mapeando as áreas onde há excesso e pouca radiação. Para esta leitura utilizou-se o plug-in DIVA, que possibilita, entre outras funções, fazer uma análise dinâmica da radiação solar incidente. Para isso foi utilizado o “Radiation Map”. Ajustado para uma simulação em alta qualidade com os seguintes: aa (ambient accuracy) .1; ab (ambient bounces) 7; ad (ambient division) 4096; ar (ambient resolution) 512; as (ambient super-samples) 1024; dr (direct relays) 2; ds (direct sampling) .2; lr (limit reflection) 12; lw (limit weight) .001; st (specular threshold) .01. A simulação da radiação teve como arquivo climático o BRA\_FLORIANOPOLIS838990\_SWERA, referente à cidade de Florianópolis, SC, Brasil. O entorno paramétrico estava modelado de forma randômica, variando edifícios com 25m a 35m de altura, o meio-fio estava com 0,20m de altura, os passeios com 2m e as ruas com 10m de largura. A construção foi dimensionada com 22m de comprimento, 12m de largura, quatro pavimentos (cinco lajes) e com as estruturas para o suporte dos painéis com 0,30m de profundidade e 10cm de largura. Os elementos de fachada somavam-se em 44, dos quais 28 estavam voltados para o Norte e 16 para o Oeste, somando ao total 12 por andar.

Com a radiação mapeada foi possível local os elementos de fachada conforme os limites dos índices de radiação (máximos e mínimos) de cada andar. Com estas informações é possível ajustar a composição de cada andar adaptando o resultado compositivo para um determinado uso ou resultado lumínico natural. Contudo, os ajustes das composições estão amarrados a uma regra que organiza os elementos de fachada de modo que os que possuem uma maior área subtraída (mais iterados) são localizados nas áreas registradas com os menores índices de radiação, e os com possuem a menor área subtraída (menos iterações) são posicionados nas regiões que apresentam as maiores incidências de radiação.

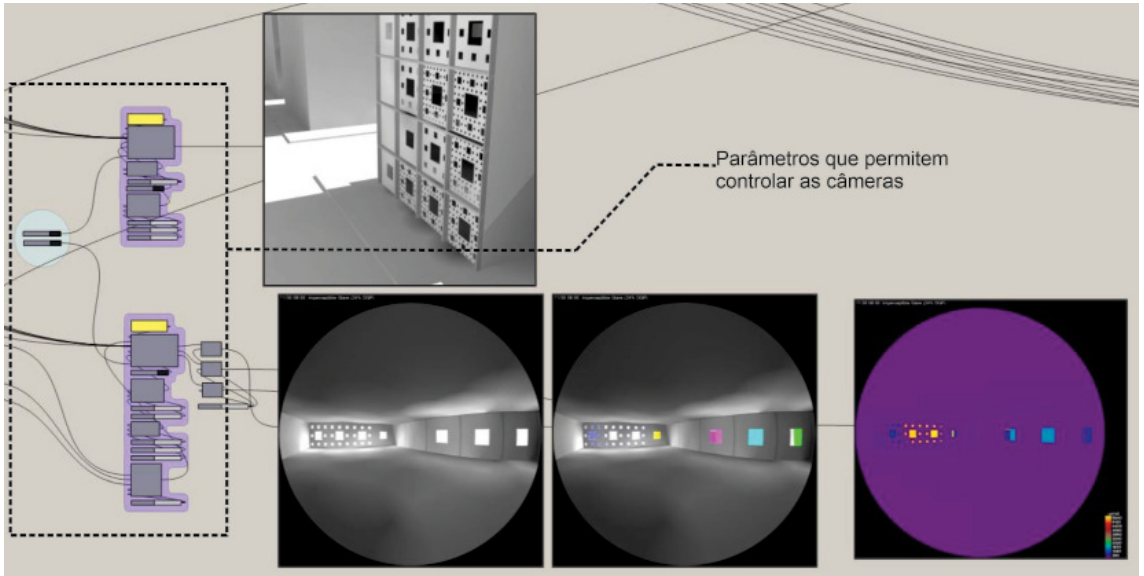
Com o arranjo posicionado, pode-se iniciar a quarta etapa do processo, referente a verificação virtual do processo através de simulações do comportamento da luz interna e renderizações do resultado final. Para a avaliação do comportamento da luz natural interna de cada andar, utilizou-se o plug-in do DIVA com seu componente “Annual Daylight”. Para as análises, a pilha é ajustada novamente em alta qualidade, com os mesmos parâmetros descritos anteriormente. Como resultado desse componente, é possível observar o indicador “Spatial Daylight Autonomy” (sDA). A figura 8 apresenta uma amostra dessa simulação



**Figura 8:** Resultado da primeira simulação.

**Fonte:** Os autores (2018).

Para analisar visualmente o resultado da composição no ambiente interno e externo, três componentes de câmeras do DIVA foram programados em um ponto parametricamente alterável em cada andar. Uma outra câmera externa foi ajustada para observar o resultado da composição completa, podendo ser direcionada em diferentes ângulos. Essas câmeras permitem a visualização renderizada do ambiente interno e externo em diferentes horários e datas. A Figura 9 demonstra esta parte do processo com as três câmeras internas e a externa.



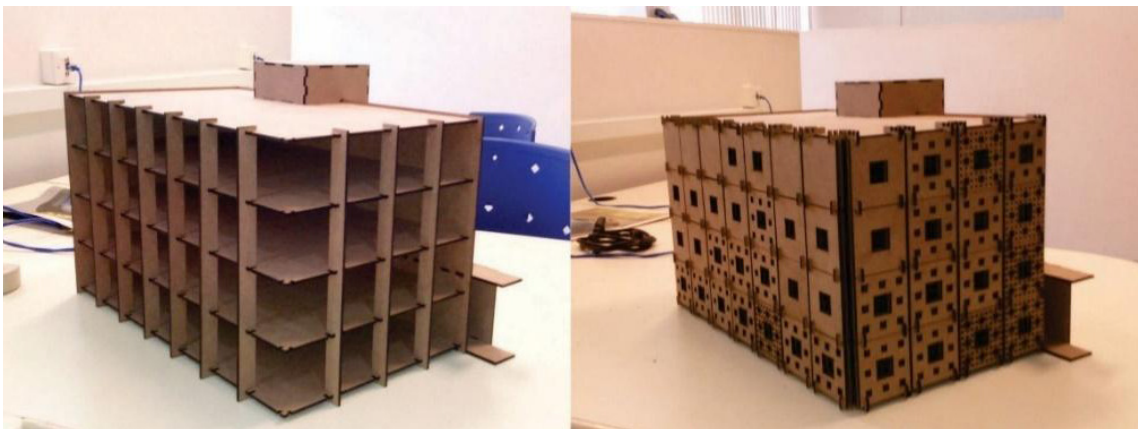
**Figura 9:** Parte do processo que permite visualizar a composição e seus controladores.

**Fonte:** Os autores (2018).

Ao final do processo, uma última etapa foi desenvolvida com o intuito de auxiliar o projetista a observar os resultados da sua composição. Para isso, um modelo físico da construção foi recriado, utilizando peças em MDF 3mm, na escala 1/50, com os elementos de fachada cabíveis de intercambiar de maneira analógica. Esse modelo foi desenvolvido com o auxílio de uma cortadora a laser, em que todas as peças que compunham a maquete foram projetadas para serem montadas por meio de cavas e encaixes, sem a necessidade de cola ou parafusos. Essas partes possibilitam que o modelo físico acompanhe as modificações da composição do modelo virtual. A figura 10 apresenta a montagem do modelo físico do edifício.

**Figura 10:** Montagem modelo físico em MDF 3mm na escala 1/50.

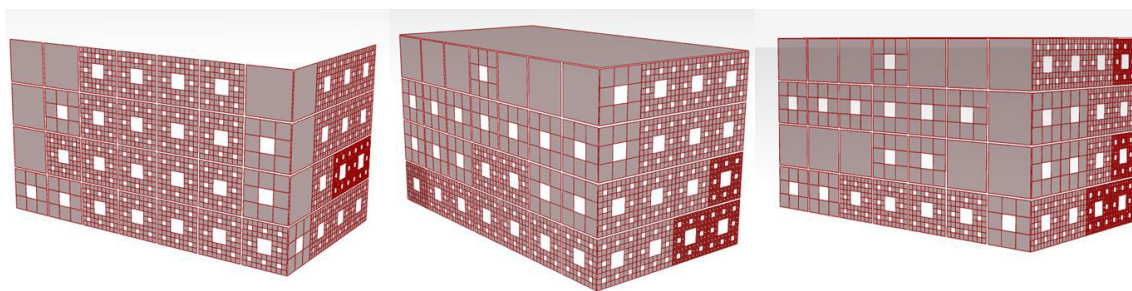
**Fonte:** Os autores (2018).



## RESULTADOS

Estas cinco etapas (quatro digitais e uma digital-analógico) criam uma sequência de ações que modelam um entorno urbano, recriam uma construção, compõem uma fachada com elementos de proteção solar com características da geometria fractal linear e possibilitam avaliar visualmente, de modo digital e físico, seu arranjo e conseqüente comportamento lumínico natural

O modelo apresentou potencialidades a respeito da montagem da composição dos elementos de fachada e simulação do comportamento lumínico interno com diferentes entornos urbanos e arquivos climáticos de geolocalizações distintas. A composição dos painéis era constantemente alterada, conforme os parâmetros de arranjos conforme: o sombreamento recebido pela edificação; posição do Norte; localização geográfica; e modificação da infraestrutura. A figura 11 apresenta uma amostra dessas diferentes organizações.



**Figura 11:** Diferentes arranjos compostos com o processo.

**Fonte:** Os autores (2018).

Outro resultado identificado, a respeito da utilização de um processo paramétrico aliado a um modelo físico, é em relação a potencialização da compreensão dos resultados desenvolvidos dentro do ambiente digital. O modelo físico permite uma avaliação sensorial mais completa interpretação detalhada da composição. A utilização do modelo físico foi de suma importância na composição do resultado final em um dos testes. Ao avaliar o índice lumínico e padrão compositivo como satisfatório, para determinada composição no ambiente virtual, esta organização foi reproduzida em um modelo físico. A maquete possibilitou observar de diferentes ângulos e perspectivas a composição dos elementos de fachada, demonstrando que mesmo atendendo às expectativas do comportamento lumínico natural a organização dos elementos não satisfazia positivamente o partido desejado para o edifício. Assim, no próprio modelo físico pode-se propor novas organizações, e reverter o sentido do processo, repassando a composição da maquete, de maneira semelhante, para o ambiente digital. Novamente no ambiente digital, pode-se testar a composição em relação ao índice lumínico e aprová-la ou não.

## CONCLUSÕES

Ao fim do processo e análise dos resultados pode-se concluir que a utilização da geometria fractal no desenvolvimento de elementos de fachada é um amplo tema a ser explorado na potencialização do uso da iluminação natural em ambientes internos e como suporte para discutir novos métodos de projeto e tecnologias no processo de projeto.

O processo completo amplia a possibilidade de decisões do projetista e

promove mais assertividade quanto ao resultado da composição dos painéis e aos possíveis comportamentos da luz natural no ambiente interno. A composição gerada pela incidência de radiação na fachada também induz à organização racional dos elementos. Suas diferentes iterações, além de disponibilizar uma variedade de composições formais, permitem um controle de índices lumínicos dentro do ambiente e dos resultados físicos da composição. Estes resultados, por sua vez, levam a crer que a utilização da geometria fractal no desenvolvimento de elementos de fachada pode aprimorar o uso dos elementos de controle solar do ponto de vista compositivo e de controle lumínico.

Com a montagem do modelo em escala foi possível verificar a composição de maneira qualitativa, avaliando-a positiva ou negativamente conforme o resultado gerado pela simulação. Esta avaliação física permite a real interpretação da composição dos elementos, e caso o resultado não esteja satisfatório, há a possibilidade de realizar novos ajustes de maneira que seja gerado um novo resultado quantitativo do arranjo.

Sugere-se que novos aprimoramentos e testes devem ser feitos no algoritmo para um refinamento de resultados. Dentro das possíveis mudanças no algoritmo, pode-se destacar um novo código paramétrico para o entorno, levando em consideração relevo, inclinação das ruas, maior número de quadras, maior número de lotes nas quadras e a possibilidade de inserir a construção em diferentes locais.

Durante o processo também foi possível identificar duas dificuldades. A primeira em respeito ao entendimento da programação por terceiros nas suas etapas mais avançadas, pois, o processo final não apresentou uma interface amigável ao usuário. E a segunda é em respeito a alta capacidade de processamento requerida para o desenvolvimento da programação, que pode ser um limitador para processos futuros mais extensos.

## 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 - UFSC, por propiciar o ambiente e os demais recursos intelectuais imprescindíveis para que o presente trabalho fosse concluído, assim como os laboratórios HiperLab - UFSC, LabCon - UFSC e PRONTO 3D - UFSC.

## REFERÊNCIAS

- ASSIS, Thiago Albuquerque de et al. Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 2, p.2304.1-2304.10, 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1806-11172008000200005>.
- HERNANDEZ, Carlos Roberto Barrios. Parametric Gaudi., SIGRADI 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, Brasil: UNISINOS, 2004, p. 213-215.
- BARNESLEY, Michael; HUTCHINSON, John E.; STENFLO, Örjan. V -variable fractals and superfractals. Cornell University Library, v. [1], n. [1], p.1-17, dez. 2003.
- 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.
- CARTANA, Rafael Prado. **Desempenho térmico e lumínico de elementos de controle solar para fachadas desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital**. 2018. 348 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação

em Arquitetura e Urbanismo - Pós-graduação, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2018.

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

CUNHA, Eduardo da. Mitos e verdades sobre o brise-soleil: da estética à eficiência energética. **Arquitetura Revista**, 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>.

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

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.l.], [s.1.], v. [1], n. [1], p.1-14, 2000.

FRINHANI, Paulo Eduardo et al. A matemática com os fractais. **Revista da Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu**, Manhuaçu, v. 13, n. 2, p.43-49, jul. 2015.

HARRIS, James. Integrated function systems and organic architecture from wright to mondrian. **Nexus Network Journal**, 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).

HYÖTYNIEMI, Heikki. Complex systems: science at the edge of chaos. **Espoo 2004**. Universidade de tecnologia Helsinki. 2004.

IES LM-83-12. Illuminating engineering society. Ies Spatial Daylight Autonomy (SDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). **LM-83-12 Illuminating Engineering Society of North America**, 2013. 14 p.

JOYE, Yannick. Cognitive and evolutionary speculations for biomorphic architecture. **Leonardo**, v. 39, n. 2, p.145-152, abr. 2006. MIT Press - Journals. <http://dx.doi.org/10.1162/leon.2006.39.2.145>.

MANDELROT, Benoit B. The fractal geometry of nature. Nova Iorque: W. H. Freeman And Company, 1977. 480 p.

NARDELLI, E. S.; Arquitetura e projeto na era digital. **Arquitetura revista**. Vol. 3, nº 1: 28-36, jun. 2007. ISSN 1008-5741

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>.

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

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

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

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.

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

RUMIEZ, Agnieszka. Fractal Architecture. **Architecture And Urban Planning**, 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 Architecture**, p.235-244, 2003.

SALINGAROS, Nikos A.. Fractal art and architecture reduce physiological stress. **Journal Of Biourbanism**, v. 2, n. 2, p.11-28, 2012.

SAMPER, Albert; HERRERA, Blas. A study of the roughness of gothic rose windows. **Nexus Network Journal**, v. 18, n. 2, p.397-417, 8 ago. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00004-015-0264-6>.

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, 2009.

SEDREZ, Maycon; MENEGHEL, Rafael; CELANI, Gabriela. Programação textual e visual para a geração de composições com geometria fractal: um estudo comparativo. **Anais...** 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 Research In Architecture And Construction**, Campinas, v. 4, n. 2, p.19-26, dez. 2013.

SEDREZ, Maycon; MENEGHEL, Rafael; CELANI, Gabriela. Digital fabrication of a brise-soleil using fractal geometry as generative system. **Proceedings...** ECAADE 32, Newcastle, v. 2, n. 2, p.315-325, nov. 2014.

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.

TAYLOR, Richard P.; MICOLICH, Adam P.; JONAS, David. The construction of jackson pollock's fractal drip paintings. *Leonardo*, v. 35, n. 2, p.203-207, abr. 2002. **MIT Press - Journals**. <http://dx.doi.org/10.1162/00240940252940603>.

VENTURI, Robert. **Complexity and contradiction in architecture**. Nova Iorque: The Museum Of Modern Art Papers On Architecture, 1966. 133 p.

WAIHRICH, Lorena P. et al. Pesquisa de padrões e suas aplicações em arquitetura e urbanismo: ênfase em Geometria Fractal. **Mecânica Computacional**, Buenos Aires, Argentina, n. [1], p.6341-6359, nov. 2010.

ZUHAIB, Sheikh et al. Generic assessment of optimization 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

Pedro Oscar Pizzetti Mariano  
pedro.pm@hotmail.com

Alice Theresinha Cybis Pereira  
acybis@gmail.com