

SUPERFÍCIES BIOINSPIRADAS: ESTUDO DE CASO PARA APLICAÇÕES EM PAINÉIS PARA FACHADAS DE EDIFÍCIOS

BIOINSPIRED SURFACES: CASE STUDY FOR APPLICATIONS IN BUILDING FACADE PANELS

Hilton Albano Vieira Fagundes¹

Wilson Kindlein Junior²

Everton Sidnei Amaral da Silva³

Felix Bressan⁴

Felipe Luis Palombini⁵

Resumo

Elementos da natureza apresentam grande quantidade de composições, texturas e interações morfológicas, que podem ser analisadas dentro de uma lógica geométrica. Neste sentido, no presente artigo foram estudadas formas bioinspiradas visando a aplicações em revestimento de fachadas de edificações. Inicialmente foi realizada uma fundamentação sobre geometrias da natureza, texturas e gramática da forma. Foram analisados exemplos de frutos que possuem função de invólucro de proteção. As amostras foram fotografadas em diferentes escalas, digitalizadas tridimensionalmente e tomografadas, sendo representadas, também, através de ilustrações. Após esta etapa, foram definidos parâmetros geométricos da sua estrutura e realizados estudos de parametrizações bidimensional e tridimensional, utilizando *softwares* generativos que possibilitam variações compositivas tanto formais quanto cinéticas. Como conclusão é possível afirmar que este método de investigação que leva em conta diferentes áreas de conhecimento (biologia, design, engenharia, matemática, arquitetura), apresenta-se como ferramenta atual e relevante permitindo ao projetista explorar novas configurações aplicadas a superfícies, apoiando-se em conhecimentos advindos desta relação multidisciplinar.

Palavras-chave: biônica; fachadas de edifícios; gramática da forma; STEAM; design e tecnologia; texturas e superfícies.

Abstract

Elements of nature present a great amount of compositions, textures, and morphological interactions, which can be analyzed within a geometric logic. In this regard, this paper explores the study of bioinspired shapes aiming at applications in building facade panels. Initially, a review was carried out on geometries

¹ M.e, Programa de Pós-Graduação em Design – PGDesign (Doutorando), Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, hilton.arquiteto@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1359-7278.

² Professor Doutor, UFRGS, Departamento de Materiais – DEMAT, Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS, Brasil. wilsonkindleinjuniorgmail.com; ORCID: 0000-0002-5939-4126.

³ Professor Doutor, UFRGS, Departamento de Design e Expressão Gráfica – DEG, Faculdade de Arquitetura, Porto Alegre, RS, Brasil, everton.amaral@ufrgs.br; ORCID: 0000-0001-7587-4755.

⁴ Professor Doutor, UFRGS, Departamento de Artes Visuais – DAV, Instituto de Artes, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, felixbressan@gmail.com; ORCID: 0000-0003-1040-5477.

⁵ M.e, Programa de Pós-Graduação em Design – PGDesign (Doutorando), Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, felipe.palombini@ufrgs.br; ORCID: 0000-0002-2112-6695.

of nature, textures, and shape grammar. Examples of fruits that have a protective wrapping function were analyzed. Samples were photographed at different scales, three-dimensionally digitalized and CT-scanned, being represented through illustrations. After that, geometric parameters of its structure were defined, and two- and three-dimensional parameterization studies were performed, using generative software that allow both formal and kinetic compositional variations. In conclusion, it is possible to state that this research method, which takes into account different areas of knowledge (biology, design, engineering, mathematics, architecture), is presented as a current and relevant tool allowing the designer to explore new configurations applied to surfaces, supported by knowledge arising from this multidisciplinary relationship.

Keywords: bionics; building facade; shape grammar; STEAM; design and technology; textures and surfaces.

1. Introdução

Projetos para o design de produtos possibilitam utilizar-se da natureza como fonte de inspiração ou modelo para investigação na busca de soluções projetuais, incluindo desde formas inovativas, princípios constitutivos e até a otimização de estruturas. Muitas das formas da natureza trazem padrões os quais apresentam um amplo espectro de composições, texturas e interações morfológicas que podem ser observados e entendidos a partir de uma lógica matemática. Tais padrões, uma vez definidos a partir de parâmetros, podem vir a se constituir em um método ou sistema de projeto que multiplica as opções de escolha através de processos de melhorias sistemáticas. Desse modo, a biônica pode ser entendida a partir de muitos conceitos, mas tomando como base dois caminhos metodológicos, na relação entre problemas e soluções. O primeiro parte de problemas pela qual designers/projetistas buscam na natureza soluções, e um outro parte do desenvolvimento de novas aplicações para princípios encontrados na natureza (KINDLEIN JÚNIOR; GUANABARA, 2005).

A morfologia refere-se ao estudo da forma e da estrutura de um organismo ou sistema. Considerando os seres da natureza, e as transformações que percorrem através da passagem do tempo, a morfologia pode trazer características que lhes são comuns, estas podem ser transferidas dos sistemas naturais para o design. Sistemas na natureza normalmente têm uma razão funcional, de modo que o ambiente tem uma influência significativa na evolução da forma, arranjo e composição de sistemas naturais, em que a diferenciação morfológica é frequentemente buscada. Muitos destes organismos desenvolvem meios morfológicos e comportamentais para suplementar estratégias de adaptação ambiental. Alguns elementos do reino animal, como esqueletos ósseos, e do reino vegetal, como troncos e galhos de árvores, são frequentes inspirações morfológicas em projetos de estruturas e volumetrias exploradas pela arquitetura. Os sistemas naturais seguem configurações morfológicas especiais as quais lhes permitem criar interfaces, objetivando uma boa interação com seu habitat natural. Portanto, sob tais aspectos, a morfologia pode ser considerada uma base apropriada para aplicações biomiméticas, para adaptação ao ambiente e, particularmente em aplicações no projeto de revestimentos de superfícies, como as fachadas de um edifício.

Conforme Badarnah (2017), edifícios representam uma parte significativa do consumo total de energia, especialmente nos países desenvolvidos onde a complexidade das atividades que abrigam é maior. Os conhecimentos que levam a uma crescente conscientização ambiental dizem da necessidade em reduzir as demandas de energia sendo vitais as soluções mais sustentáveis e resilientes. Esta resiliência está associada a capacidade de um elemento para recuperar

de uma mudança e/ou responder adequadamente a condições variantes. Na natureza, este problema é abordado pela aplicação de estratégias de adaptação – o processo no qual um organismo se torna mais adequado ao seu ambiente, o que é fundamental para a eficiência e sobrevivência a curto e longo prazo. Projetar fachadas de edifícios que tenham a capacidade de se adaptar a seus ambientes não só aumenta a sua performance, como também a sua sustentabilidade, exigindo um aporte menor de energia para operar e, assim, empregar recursos de maneira mais eficiente e acessível.

Softwares paramétricos permitem que sistemas se regenerem em vez do redesenho ou da edição de projetos. Neles, são os parâmetros de um projeto particular que são declarados, não uma forma explícita. A modelagem paramétrica é baseada, então, nas relações entre objetos controlados por essas variáveis. Estabelecer relações entre partes de um projeto permite que eles mudem juntos de forma coordenada, definindo, assim, uma geometria associativa. Atribuindo valores diferentes para as variáveis, modelos alternativos podem ser facilmente criados. Os modelos são, assim, sistemas algorítmicos hierárquicos controlados por relações unidirecionais. *Softwares* paramétricos permitem a definição de um modelo de duas maneiras principais. Uma usando uma linguagem de programação textual específica, e outra, exemplificado em ferramentas como *Generative Components* e *Grasshopper*® as quais permitem o uso de uma programação de linguagem visual para elaborar diagramas ou gráficos que representam o algoritmo que irá gerar o modelo paramétrico. Comparado ao sistema textual de linguagens de programação, essas ferramentas exigem um menor nível de abstração, e podem ser empregadas, por exemplo, para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos bioinspirados, através da gramática da forma. Sendo assim, este estudo está centrado na análise morfológica a partir das superfícies de alguns frutos, bem como nas suas interações geométricas relacionadas à superfície e à textura. Inicialmente é apresentada uma fundamentação dos principais tópicos abordados, tais como geometria e formas da natureza, biomorfose e texturas. Em seguida são mostrados os conceitos de gramática de forma, sendo posteriormente exemplificados através de uma metodologia de projeto que foi utilizada para o desenvolvimento de uma fachada conceitual inspirada na morfologia externa do fruto da semente de uma palmeira.

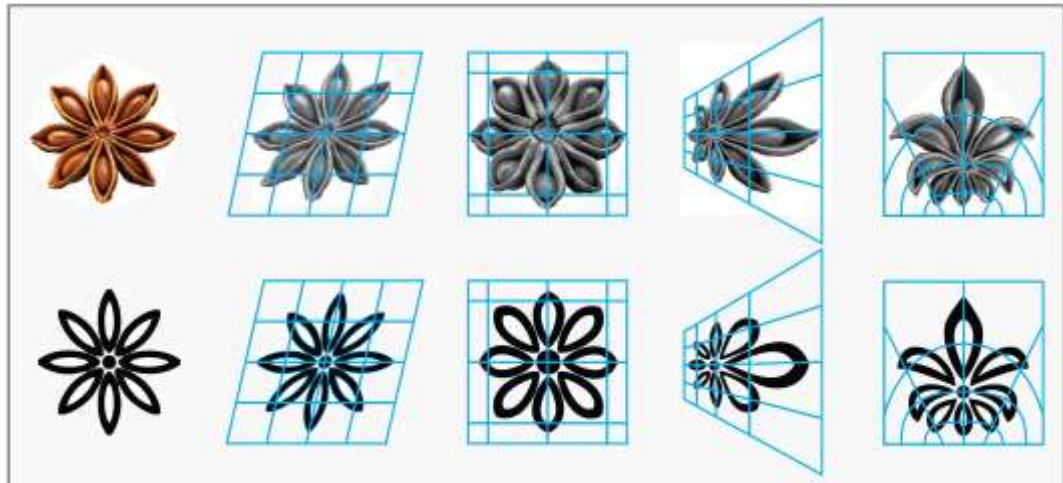
2. A Geometria e as Formas da Natureza

Segundo Gago (2016), a interpretação e decodificação do processo de design biológico através de uma perspectiva geométrica visa fornecer ao design a capacidade em produzir formas coerentes visando a uma aplicação técnico-científica. Segundo Badarnah (2018), a morfologia e os traços da forma são os elementos mais comuns a serem transferidos dos sistemas naturais para a arquitetura. No entanto, tais características raramente retêm qualquer função dos sistemas referenciados na natureza e, assim, dificilmente representam uma solução focada no design biomimético. Quanto mais complexo o elemento natural analisado, mais organizada e distinta é a superfície que o reveste.

As forças físicas e parâmetros internos de crescimento regulam as formas biológicas, sendo expressas através de padrões geométricos em um espaço morfológico. Para Abzhanov (2017), em seus estudos sobre o trabalho do biólogo e matemático D'Arcy Thompson, afirma que este autor procurava compreender como as formas biológicas particulares eram geradas durante o desenvolvimento e como elas poderiam sofrer mudanças ao longo de seu período evolutivo. Assim, a observação científica da natureza pode ser entrelaçada com a experiência estética das coisas e estruturada em ordem. Provavelmente o mais famoso conjunto de observações em *On Growth and Form*, vem das tentativas de Thompson de relacionar formas biológicas umas com as outras através de transformações geométricas. A Figura 1 apresenta um

exemplo das transformações.

Figura 1: Exemplo de transformações geométricas a partir da teoria de D'Arcy Thompson.



Fonte: Autores, baseado nos trabalhos de Thompson (1917).

As tentativas de descrever animais e plantas, principalmente por razões taxonômicas, são longínquas. Este campo da biologia se interessa nos aspectos gerais, tanto externos (tamanho, forma, cor e padrão) quanto internos (como por exemplo as características dos órgãos e estruturas). Com base nisto pode-se afirmar que uma superfície pode ser definida à luz de seus três componentes básicos: forma, ondulação e rugosidade. A forma pode ser entendida como seu componente mais significativo e de mais fácil de observação (esférica, cilíndrica, plana), ou seja, representada como um determinado ente geométrico. Em um exame mais próximo desta superfície (em vista desarmada ou com aparelhos) é possível observar a presença de uma quantidade de ondulações e, a partir destas, sua constituição por estruturas ainda menores, pequenos picos e vales, representando sua rugosidade.

Segundo Gago (2016), um padrão de crescimento geométrico é composto por três parâmetros: a origem, a expansão e a conexão. A origem é a fonte de informação que dá corpo a uma estrutura, definindo o caráter morfológico e estrutural. Assim, as características exigidas correspondem à definição de um vocabulário geométrico e ao estabelecimento de proporções harmônicas entre a expansão e a conexão. A expansão se apresenta como a reprodução da origem e como ela se propaga no espaço, requerendo como características a repetição e o centro, entendidas como o tema da expansão estrutural. Já a conexão se concentra em como as estruturas biológicas funcionam, ou seja, sua interação e capacidade de se encaixar no ambiente. A característica geométrica associada a ela é a união entendida como tema da integração espacial. As estruturas biológicas são compostas por dois tipos de formas: estruturais, as quais materializam as composições, e expansivas, que controlam a distribuição das estruturais, possuindo uma distribuição não aleatória, pois esta estabelece relações proporcionais entre elas. A expansão estrutural ocorre através de níveis referenciados em um centro e é feita por uma repetição de elementos com uma particularidade geométrica. Essa qualidade exige a presença de três características: contraste, em que os elementos são facilmente identificáveis e delineáveis; simplicidade; em que os elementos são distribuídos por adjacência e simetrias locais, em elementos com um perímetro irregular. Quando todas essas características aparecem simultaneamente, elas criam um efeito de rugosidade.

Gago (2016) afirma que, em um projeto, as questões importantes a serem resolvidas sobre a forma dizem respeito de como ela pode alcançar uma determinada qualidade morfológica, e como é possível transferir essas qualidades para as estruturas, como as arquitetônicas. Um destes caminhos a ser escolhido é a identificação de um conjunto de características do padrão morfológico das estruturas biológicas. Isto pode acontecer através do desenvolvimento de ferramentas de design capazes de gerar estruturas com propósitos de implementar qualidades por diversidade formal e revelar princípios estruturais organizacionais por dependência de elementos – integrando a forma com o meio. Conforme Schumacher (2018), muitos dos resultados da pesquisa em biomimética, assim como as características gerais da forma orgânica, com potencial de trazer vantagens organizacionais e composicionais-articulatórias a projetos, fazem parte de uma nova linguagem denominada de linguagem biomorficamente inspirada.

Ao abordar as texturas no contexto deste trabalho, busca-se identificar as suas importantes relações com os estudos de padrões geométricos em um espaço morfológico. Ressaltando as inusitadas composições e arranjos dos sistemas naturais que frequentemente inspiram aplicações industriais, é possível fazer referência às texturas, em suas escalas, como uma importante via de percepção. As texturas, segundo Villafañe e Mínguez (2002), são definidas como um agrupamento de linhas ou pontos situados à igual ou similar distância, uma das outras, em um espaço bidimensional e eventualmente tridimensional.

Um elemento morfológico é frequentemente indissociável do plano e da cor, nos orientando a considerar a superfície como um local de transmissão de informações. Podemos dizer que estas características permitem a condição de sensibilizar a superfície aos olhos do observador, em distintos níveis de percepção, pressupondo a “pele dos objetos” (MANZINI, 1993) e funcionando como expressão (DONDERO, 2010). Nesta analogia, Manzini qualifica o produto, não exclusivamente por sua geometria resultante do processo biomórfico, mas também por suas características superficiais inusitadas.

Definindo texturas, Haralick (1979) estabelece duas dimensões aplicáveis: a dos elementos de base, ou primitivas, que preservam a referência a partir das quais é originada a textura; e organização espacial destas primitivas. Considerando a percepção multidimensional, Wong (2001), classifica as texturas na esfera visual e tátil como: texturas naturais disponíveis, que são preservadas em seu estado natural; texturas naturais modificadas, que sofrem leves intervenções pela indústria e texturas organizadas, que são manipuladas ao nível dos materiais.

Ponderando sobre um importante fator classificatório das texturas, Dondero (2010) aborda as dificuldades relativas à identificação de escala das texturas. Isto é, até que ponto dimensional uma textura deixa de ser textura e passa a ser considerada como forma. Ele sugere considerar a delimitação da capacidade perceptiva do usuário, quando elementos perdem a capacidade discriminatória ao nível formal, imergindo em uma escala micro topográfica, reconhecida como microtextura. Buscando integrar elementos para caracterização de escala em texturas, Berthier (1991) realizou uma análise do perfil de diferentes estradas e calçamentos, onde os padrões das texturas são dimensionalmente estabelecidos pelo tamanho de seus comprimentos de onda. Porém, existe carência de publicações que estabeleçam relação de proporcionalidade entre os padrões de texturas naturais e aqueles bioinspirados, como, por exemplo, em fachadas de edificações. A respeito disso cabe aprofundar o estudo da Gramática da Forma dos padrões da natureza nas várias escalas (mega, macro e micro).

3. Gramática da Forma e Padrões da Natureza

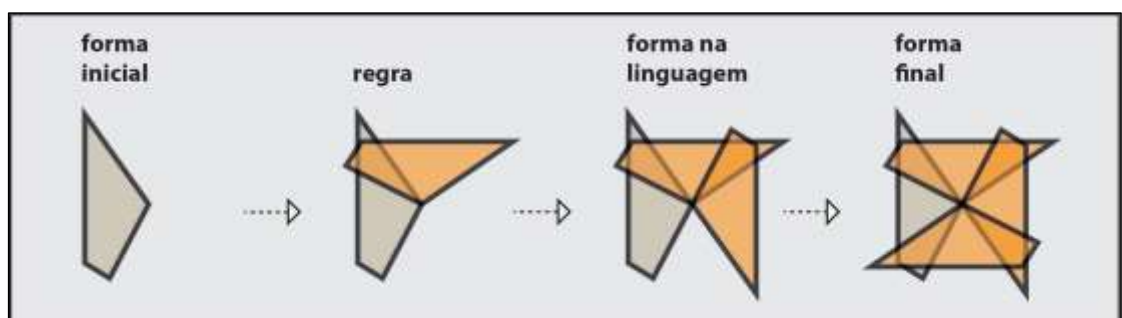
As regras geométricas estão baseadas nas ideias de proporções e simetrias, o que as torna um

importante recurso para os projetos de design e arquitetura. Conforme Lorenzi & Schiavello (2018), a partir da natureza e de formas geométricas simples, artistas contemporâneos e arquitetos projetaram superfícies complexas, muitas vezes usando uma abordagem paramétrica.

Gago (2016), ao analisar como as características de crescimento do padrão biológico funcionam como mecanismo de transferência para o projeto arquitetônico, afirma que podem ser empregadas duas ferramentas de design generativo: diagramas de Voronoi e gramáticas da forma. Os diagramas de Voronoi podem ser empregados no projeto na reprodução de texturas naturais. Seu padrão comum revela algumas das características de crescimento identificadas (vocabulário geométrico, repetição e união). No entanto, quando descartado, através de uma organização centroide revela, na maioria dos casos, a presença de todos eles. E é precisamente com a intenção de gerar essa ordem que o processo de design usa gramáticas da forma. A gramática da forma difere dos diagramas de Voronoi operando através de um processo de sucessivas transformações de formas usando regras descritas com linguagens geométricas e algébricas. Como esta ferramenta permite a geração de elementos através de outros, ela pode ser usada para controlar a expansão, o caráter morfológico e as proporções da forma. Com o emprego desta ferramenta se pode alcançar uma coerência morfológica entre estruturas biológicas e humanas, introduzindo no design certas qualidades da morfologia biológica, tais como equilíbrio evolutivo, capacidade de integração no ambiente, fluidez estrutural e multifuncionalidade estrutural.

Conforme Stiny (1980), a habilidade para reconhecer sub-formas em uma desordem de linhas, não importando sua proporção, tamanho e orientação é a base da gramática da forma. As gramáticas da forma fornecem uma poderosa abordagem generativa para a descrição, interpretação, e avaliação de projetos existentes, bem como para novos projetos. As formas são concebidas com uma coleção finita máxima de linha; e uma solução de design é criada pela aplicação de regras para uma forma inicial até que não possam ser aplicadas mais regras ou uma solução seja encontrada (Figura 2).

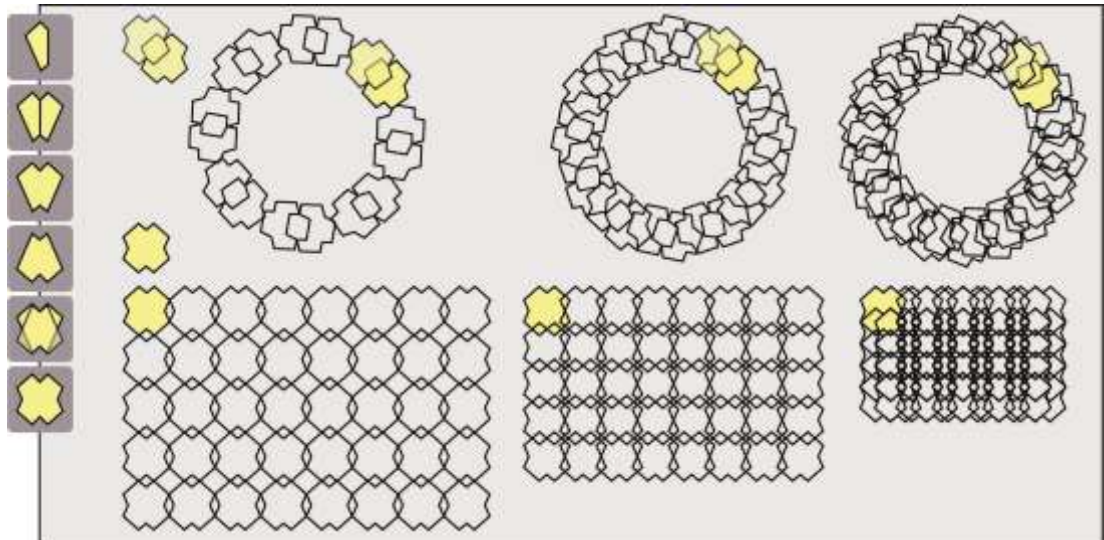
Figura 2: Gramática da forma: forma inicial, regra, forma da linguagem e forma final (emergente).



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Subjacentes às regras compõem as transformações geométricas, tais como translação, escala, rotação, duplicação, dimensionamento, cópia, deslocamento, interseção, subtração e reflexão; as quais permitem que uma forma seja parte de outra (Figura 3). A gramática da forma tem como característica, ainda, ser um conjunto de números finitos de regras as quais podem gerar um número indefinido de soluções de design. Pode ainda ser uma importante ferramenta de análise, para decomposição de formas complexas e como ferramenta de síntese (TEPAVCEVIC & STOJAKOVIC, 2012).

Figura 3: Aplicação da gramática de forma – exemplos aplicados na geração de padrões.



Fonte: Autores, baseado nos trabalhos de Cenani & Cagdas, 2006.

A gramática da forma não consiste, obrigatoriamente, na implementação de aplicativos ou no uso de programação, pois trata de uma maneira de pensar sobre determinado projeto de maneira lógica e matemática. Conforme Tepavcevic & Stojakovic (2012), a gramática da forma foi adotada muito antes da elaboração das ferramentas convencionais de projeto CAAD (*Computer-Aided Architectural Design*). Contudo, sendo um sistema baseado em regras, tornou-se uma estrutura para a teoria computacional do design. Nela, essas são classes específicas de sistemas especialistas baseadas em regras da inteligência artificial que geram formas geométricas.

Conforme Betancourt, Quintero e Cereceda (2014), em um estágio inicial de aprendizagem paramétrica, dada a variedade de operações e componentes é difícil saber qual deles pode concluir determinadas ações específicas. Ou seja, torna-se mais complexo compreender que cada componente requer um tipo de entrada de dados e, em seguida, gera um tipo específico de saída de dados, que pode ser manipulado em um estágio futuro do algoritmo. A implementação de um processo de design baseado no crescimento não apenas impõe essas qualidades em elementos, mas também se destaca ao dar-lhes uma organização estrutural. A contribuição da variável de crescimento para o processo de design ocorre tanto no nível de organização das características geométricas, quanto de qualidades geométricas que emergem de sua presença.

No presente estudo, com as formas da natureza envolvendo padrões de superfície de frutos de casca dura, buscou-se a geração de uma diversidade de soluções com uma mesma identidade geométrica, como ocorre com a estrutura da natureza que lhe deu origem. A criação de Stiny e Gips, *Shape Grammars (SG)*, colocou as bases para a pesquisa em abordagens de design algorítmico no contexto de análise de projeto e síntese de design (ALFARIS, 2009). Conforme Knight (1999), as gramáticas da forma são algoritmos espaciais, em vez de textuais ou simbólicos, onde cada regra identifica uma forma e a substitui por outra. As gramáticas da forma operam aplicando recursivamente tais regras a uma forma inicial.

A compreensão de padrões da natureza aplicada à gramática da forma serve para enriquecer a capacidade do designer em gerar desenhos originais a partir da investigação de regras geométricas que podem ser obtidas a partir de ideias de proporções e simetrias, como catego-

rias estéticas. A variação entre os elementos da natureza e sua forma de organização e a geometria do elemento natural são capazes de formar a especialidade de cada estrutura, e atuam na aplicação de uma gramática de forma bioinspirada. Mais recentemente, sistemas geradores da natureza têm se tornado uma fonte de inspiração para arquitetos e designers. Ao invés de interpretá-los como uma abordagem de cima para baixo, linear e orientada por objetivos específicos, tais sistemas procuram compreender as regras e os princípios intrínsecos às referências naturais as quais produzem uma determinada ordem estrutural, organização de materiais complexos, associados à eficiência e a uma estética singular.

Conforme Abzhanov (2017), o design paramétrico não é novo; no entanto, com a disseminação da informática e sua capacidade em multiplicar rapidamente soluções, ele se tornou sinônimo de evolução/solução criativa e desenvolvimento das ferramentas que podem auxiliar o projetista. Para Schumacher (2018), nas transformações geométricas a partir da computação é possível verificar como vários parâmetros criam uma ampla diversidade de variações em soluções de projeto. A introdução do design paramétrico através do meio digital permitiu que projetistas pudessem especificar as relações entre os vários parâmetros onde, por exemplo, alterações em apenas alguns deles implicam com que o restante do modelo reaja e se atualize. Essas alterações são baseadas em regras associativas definidas pelo projetista. Esse tipo de geração de formas, geometrias e construções segue uma metodologia generativa e consiste na recombinação de elementos e suas transformações recursivas, fornecendo a uma, ou mais formas iniciais, uma série de regras de transformações, fazendo com que novas formas possam ser geradas por regras sucessivas.

O Grasshopper® é um ambiente virtual dentro do *software* Rhinoceros®, cuja principal qualidade é permitir o desenvolvimento de algoritmos que operam intuitivamente com dados paramétricos. Ao trabalhar no Rhinoceros®, o *plugin* Grasshopper® incorpora seus comandos e recursos, também utilizando o programa de desenho como ambiente de visualização, para que se possa observar em tempo real como o modelo em desenvolvimento é afetado. Desta forma, ele pode ser considerado uma ferramenta para projetar algoritmos de maneira interativa e que permite ao projetista, mesmo com pouco conhecimento da linguagem de programação, gerenciar ações que são capazes de unir uma sucessão de instruções com entradas e saídas, as quais produzem um resultado geométrico e formal. Levando-se em conta que para gerar uma forma referenciada na natureza em uma determinada solução de projeto, muitas vezes, é preciso coordenar múltiplos parâmetros ou buscar um número significativo de variações, essa maneira de operar fornece grande flexibilidade. Atualmente, um *software* CAD paramétrico oferece interfaces interativas tridimensionais sofisticadas que podem realizar variações em tempo real, permitindo que o projetista tenha um *feedback* imediato quando um parâmetro é alterado. A necessidade de ferramentas computacionais para a emulação da natureza evolui e se expande, atendendo à intenção do projetista em querer trabalhar com soluções inteligentes derivadas de elementos naturais.

4. Bioinspiração para Revestimento de Fachadas

O fechamento de fachadas de edificações, suas paredes e demais camadas, podem ser denominados de envelopes de construção, os quais representam a interface entre o ambiente externo e o ambiente dos espaços ocupados internamente. Estes envelopes funcionam como barreiras ou escudos às mudanças do ambiente externo adaptando o interno. Como visto, anteriormente, a natureza fornece um grande banco de dados de estratégias de adaptação em seus envelopes de revestimento, as quais podem ser, uma vez analisados, possíveis alternativas para implementação no projeto de envelopes de edificações.

Conforme Lopez *et al.* (2015), as múltiplas características ambientais e climáticas do meio (entorno) são parâmetros variáveis, ao passo que o conforto interno em edifícios é bastante estático. Desta forma, empregam-se grandes quantidades de energia para aquecer, resfriar, ventilar e iluminar os edifícios entre limites bem definidos e dentro de uma constância, mesmo que fatores ambientais externos possam mudar consideravelmente. As soluções existentes para esta questão tendem a produzir envelopes estáticos em resposta às questões dinâmicas que as atinge. Desta forma, as soluções para fachadas, assim como para telhados, se apresentam de maneira convencional e não são projetadas para adaptação ideal às questões e necessidades contextuais (insolação, variações de temperatura, vento, índice pluviométrico etc.).

Badarnah (2017) afirma que na interface entre o ambiente externo e os espaços ocupados interiores é possível se obter uma economia de energia significativa ao conceber soluções adequadas que respondem a fatores climáticos específicos. Condições ambientais estão constantemente mudando e criando desafios para acomodar a construção de envelopes. Desse modo, explorar estratégias morfológicas da natureza para a construção do invólucro de edifícios pode facilitar a adaptação às diferentes condições ambientais, empregando materiais e outros recursos de forma eficiente. A adaptação morfológica, tal como tamanho, forma ou padrão, é uma característica estrutural ou geométrica que aumenta o ajuste de um organismo para um ambiente particular e permite uma melhor funcionalidade para sobrevivência.

Beesley *et al.* (2006) afirmam que um envelope arquitetônico adaptativo é aquele que responde às mudanças nas condições ambientais internas e externas ao gerenciar o ambiente interno. Tais envelopes devem possuir estratégias de adaptação para antecipar as variações ambientais externas, bem como as atividades internas e suas interações com os habitantes. Um envelope de um edifício, aqui entendido como sua fachada, poderia ser construído não contando com as tradicionais superfícies inertes, mas sim abrigando uma ampla gama de tecnologias baseadas no comportamento dos envelopes encontrados na natureza.

Lopez *et al.* (2015) baseiam-se nas plantas e em suas estratégias de adaptação para diferentes climas. As plantas, como os edifícios, carecem de movimento e permanecem sujeitas a uma determinada localização, por isso as condições de resistência meteorológica as afeta a todo o momento, desta forma elas desenvolveram meios especiais de proteção contra o vento excessivo, a seca, o frio, o calor e a luz. Plantas, ao contrário de edifícios, se adaptaram ao meio ambiente, através de processos de evolução, ao longo de milhões de anos. Esta maneira responsiva pode envolver tanto mecanismos dinâmicos como estratégias estáticas. Os dinâmicos respondem a exigências ou estímulos externos na forma de movimentos rápidos e reativos em escala de tempo perceptíveis, tanto à luz, temperatura, calor, água ou seca tanto nos aspectos macroscópicos como em escalas microscópicas. Já as estáticas condizem à morfologia da superfície das plantas, fornecendo mais de uma solução para condições ambientais e incluem, a exemplo, superfícies refletoras de luz, super-hidrofóbicas ou super-hidrofílicas.

Para Badarnah (2017), a morfologia pode ser considerada como um elemento-chave para o desenvolvimento de soluções multifuncionais que permitem executar simultaneamente vários processos físicos. Implementar soluções morfológicas da natureza que promovam a adaptação ambiental pode melhorar o desempenho dos envelopes do prédio, aumentar conforto do ocupante e potencialmente reduzir as demandas de energia. Segundo Lopez *et al.* (2015), as sementes possuem diferentes estratégias formais e geométricas, mas todas geram formas construídas leves e otimizadas para dispersão. As sementes são superfícies funcionais que consideram a economia de forma. Para a proposição deste estudo foram abordadas algumas estratégias de projeto que podem trazer inovação através da interpretação de superfícies texturizadas e

sua aplicação em invólucros, como de fachadas e edifícios, que poderão envolver um nível menos aprofundado de tecnologia como resultado de um estudo da biomorfose de frutos de casca dura, ou seja, na macroestrutura destes. Alguns destes conceitos formais e geométricos, ainda que gerais, servem de inspiração para a adaptação, melhora e otimização de invólucros, como o caso dos envelopes de fachadas em edifícios. Considerando o conceito de design de algumas fachadas e coberturas é possível estabelecer analogias de formas bioinspiradas a partir das superfícies de determinados frutos, no caso deste estudo do fruto da Jupati, como por exemplo para a aplicação em padronagens de painéis de revestimento.

5. Estudo de Caso

Este tópico trata da aplicação da biônica e da técnica de design paramétrico para a proposição do design de uma fachada inspirada na natureza. Nesta proposta de design inspirado na natureza buscou-se os frutos de casca dura como forma da natureza com melhor correspondência a partir de alguns requisitos visuais de disposição e funcionamento da sua forma geométrica, de maneira a obter regras de uma gramática de forma associada. A partir da identificação de uma gramática de forma de natureza gráfica, é possível constituir-se de mais de uma regra, e muitas regras podem trazer problemas na escolha da melhor alternativa. Desta forma entende-se como a melhor alternativa selecionar o número de regras a serem aplicadas a forma associadas, contendo atributos de geometria, como vértices e arestas. Esta proposta de abordagem bioinspirada para projetos de design e arquitetura pode encontrar associações com formas naturais que nem sempre são óbvias, permitindo ao projetista encontrar inspiração em soluções até mais interessantes.

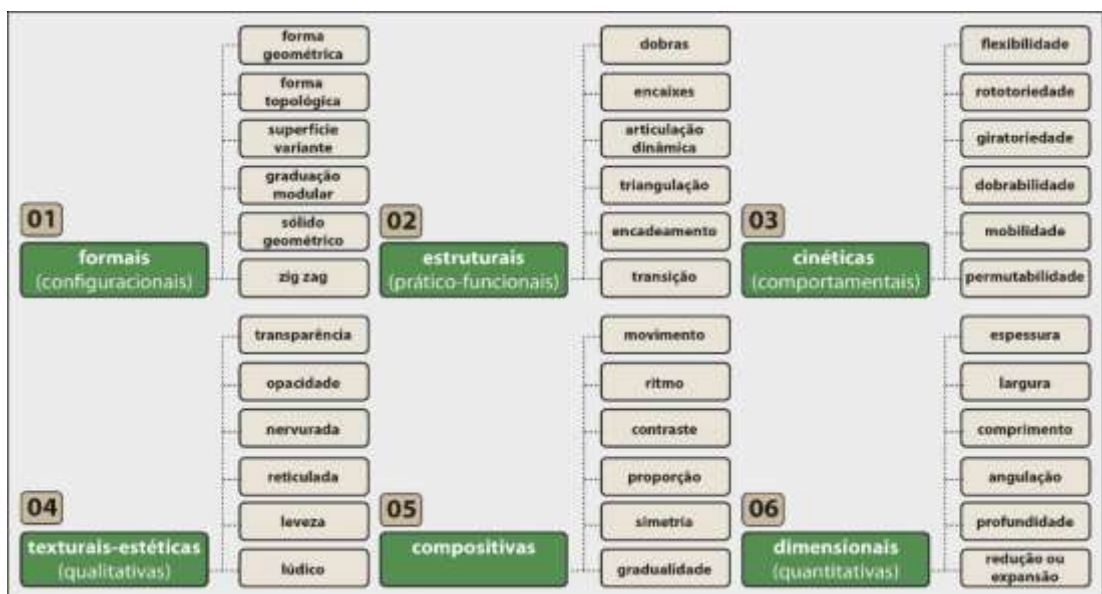
O emprego da gramática da forma proposta neste trabalho consistiu na definição de regras de composição a partir do levantamento dos componentes de uma superfície de um fruto de casca dura considerando parâmetros como: proporções, padrões de simetria e dimensões. Um passo seguinte foi o da simplificação dessas regras para possibilitar seu uso na aplicação em um algoritmo paramétrico para gerar um elemento, como por exemplo um painel de fachada formado por placas, a partir de suas variações na superfície. As regras servem para, em um primeiro momento, produzir variações que possam ocorrer em fatores tais como a melhora da resistência do material aplicado à placa sem a variação na sua espessura e, em um segundo momento, uma variação nas aberturas, proporcionando maior ou menor ingresso de luz, temperatura ou de ventilação. Nesse caso, as duas soluções podem fazer com que tais placas sirvam de elementos de proteção ou de sombreamento de fachadas. Desta forma, baseado na superfície natural texturizada de um fruto de casca dura, objetivou-se a obtenção de padrões e suas variações parametrizadas para produzir variações estético-funcionais de placas de fachada aplicadas em soluções para o envelope de edificações.

Hsuan-An (2002) afirma que o estudo estético-morfológico de formas naturais e artificiais quando efetuado de maneira adequada e sistemática deve estar apoiado em informações mais amplas sobre as características (qualidades evidentes de todos os níveis) e propriedades (qualidades essenciais) apresentadas por estas formas. Dada a grande complexidade, exige que isto seja classificado em seis categorias com o objetivo de facilitar a sua utilização como um recurso na análise morfológica. As categorias são: formais e configuracionais; estruturais prático-funcionais; cinéticas e comportamentais; texturais, estéticas e qualitativas; compositivas; e dimensionais e quantitativas. Hsuan-An (2002), além de estabelecer estas seis categorias, elencou uma série de características para cada uma, que poderão servir como critérios, parâmetros ou fatores empregados em todas as etapas, desde a análise do modelo biológico, passando pela abstração geométrica, até chegar à proposta final. Tais características não podem ser adotadas

de forma independente, pois elas estão intimamente correlacionadas. Uma vez realizada a análise morfológica de uma forma natural, as características deverão ser registradas e exploradas com os diferentes recursos de visualização e representação gráfica, como primeira etapa da análise. Na medida em que se progride o processo da síntese, eliminando-se o secundário e preservando o essencial, inicia-se um processo de geometrização para, enfim, tratar daquilo que será considerado para a parametrização.

Considerando as características das categorias empregadas para análise, e adotando como referencial o amplo estudo de Hsuan-An (2002), foram escolhidas aquelas que se relacionam com o componente biológico empregado – fruto de casca dura (Figura 4).

Figura 4: Categorias e características adotadas como referenciais biológicos desta pesquisa.




Fonte: adaptado de Hsuan-An (2002).

Considerando que este estudo busca na natureza sua inspiração, mais especificamente na flora de frutos de casca dura, a escolha teve como premissa frutos cuja casca apresentasse uma superfície texturizada em padrões geométricos. Foram evidenciadas categorias de características como foco principal da pesquisa inicial, conforme a Figura 5. Então escolheu-se as categorias e o fruto que apresentava melhores possibilidades para o estudo. Como ponto de partida da geometrização da forma considerada do fruto de casca dura, foram explorados o seu regramento individual e a sua aplicação sob determinados critérios de malha. O encaminhamento geométrico para definir uma gramática da forma deve, em primeiro lugar, tornar clara a semelhança de estrutura e aparência com o elemento que lhe deu origem; em segundo lugar deve fornecer método de composição que possa desenhar novas formas que sejam instâncias deste referencial.

Para a síntese formal do referencial de estudo, de modo a extrair suas regras compositivas e combiná-las entre si, buscou-se a formulação daquelas que permitam a criação de novas formas, satisfazendo determinadas condições pré-estabelecidas. Neste modo convencional, elencou-se algumas regras compositivas deste fruto para posterior aplicação. Uma figura abstrata, que atua como gerador e como um limite, é obtida a partir da escolha de características geométricas dos perfis dos elementos, buscando identificar o vocabulário mais representativo

de formas e associado ao menor conjunto de regras possíveis de combinação e transformação desse vocabulário, capazes de gerar todos os elementos analisados.

Figura 5: Características/categorias com maior influência em referenciais biológicos escolhidos.

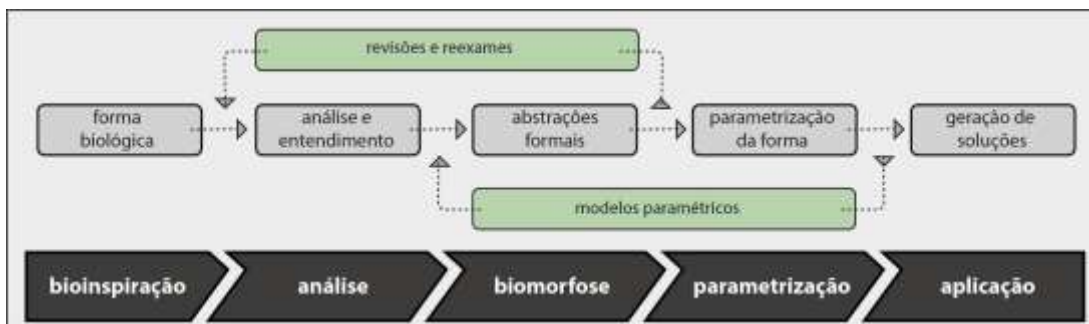
características		 Noz <i>Juglans regia</i>	 Cedro <i>Cedrela fissilis</i>	 Jupati <i>Raphia taedigera</i>
01	formais (configuracionais)	✘ ✘	✘ ✘	✘ ✘ ✘
02	estruturais (prático-funcionais)	✘ ✘ ✘	✘ ✘ ✘	✘ ✘ ✘
03	cinéticas (comportamentais)	✘ ✘	✘ ✘ ✘	✘ ✘
04	texturais-estéticas (qualitativas)	✘ ✘	✘ ✘	✘ ✘ ✘
05	compositivas	✘	✘ ✘	✘ ✘ ✘
06	dimensionais (quantitativas)	✘ ✘ ✘	✘	✘ ✘

importância: ✘ pouca ✘ ✘ média ✘ ✘ ✘ muita

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Este estudo trata de um processo impulsionado pelas formas da natureza, mais especificamente pelas texturas de frutos de casca dura a partir da observação dos princípios formais, sua implicação na geometria da forma em parte e como um todo, abstrair uma forma básica para aplicação dentro de uma gramática da forma através da parametrização, para então encontrar uma família de possibilidades e possíveis aplicações técnicas em sistemas de superfícies texturizadas como podem ser as fachadas em arquitetura (Figura 6).

Figura 6: Percurso de etapas para a obtenção de soluções em superfícies texturizadas.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Procurou-se, como princípio geral, o desenvolvimento de um repertório considerando as regras gerais da natureza observada. A partir das informações destes modelos referenciais

para que, neste caso, forma e superfície sejam analisadas de maneira a produzir um modelo geométrico que englobe gramáticas da forma. Uma vez obtidas, procura-se multiplicar soluções que, neste caso, podem se ocupar de processos generativos empregando um *software* de parametrização.

Todos os passos até chegar à proposta bioinspirada deste trabalho são mostrados, em detalhes, na Figura 7. Inicialmente foi realizado um levantamento fotográfico em diferentes escalas. A macrofotografia é uma das principais técnicas de registro fotográfico de magnitudes inferiores à microscopia, mas que permitem excelentes qualidades focais, de modo a explicitar com fidelidade as cores e texturas do elemento fotografado. Também pode ser empregada digitalização tridimensional a laser do fruto, com posterior tratamento da imagem. Neste trabalho foi também realizada tomografia computadorizada, para investigar tanto o exterior quanto o interior do elemento natural. Em seguida foi realizada uma representação gráfica na forma de desenho de observação. Após, tem-se a criação de um modelo geométrico computacional baseado nas representações anteriores, sendo realizada, então, a análise da geometria do modelo. Com isto, tem-se a obtenção de uma gramática da forma, sendo feito o levantamento de alguns dados para uma parametrização da superfície texturizada a partir de *software* generativo realizada em 2D e em 3D. A partir dos parâmetros encontrados, buscou-se estudar possibilidades de aplicação em soluções de produtos e gerando novas formas parametrizadas. Com a geração de formas tridimensionais a partir de modelos, por fim, tem-se a análise dos modelos e resultados, contendo modificações e atualizações.

Figura 7: Obtenção de soluções bioinspiradas – uma proposta para sequenciamento passo-a-passo tomando o exemplo do fruto da Jupati



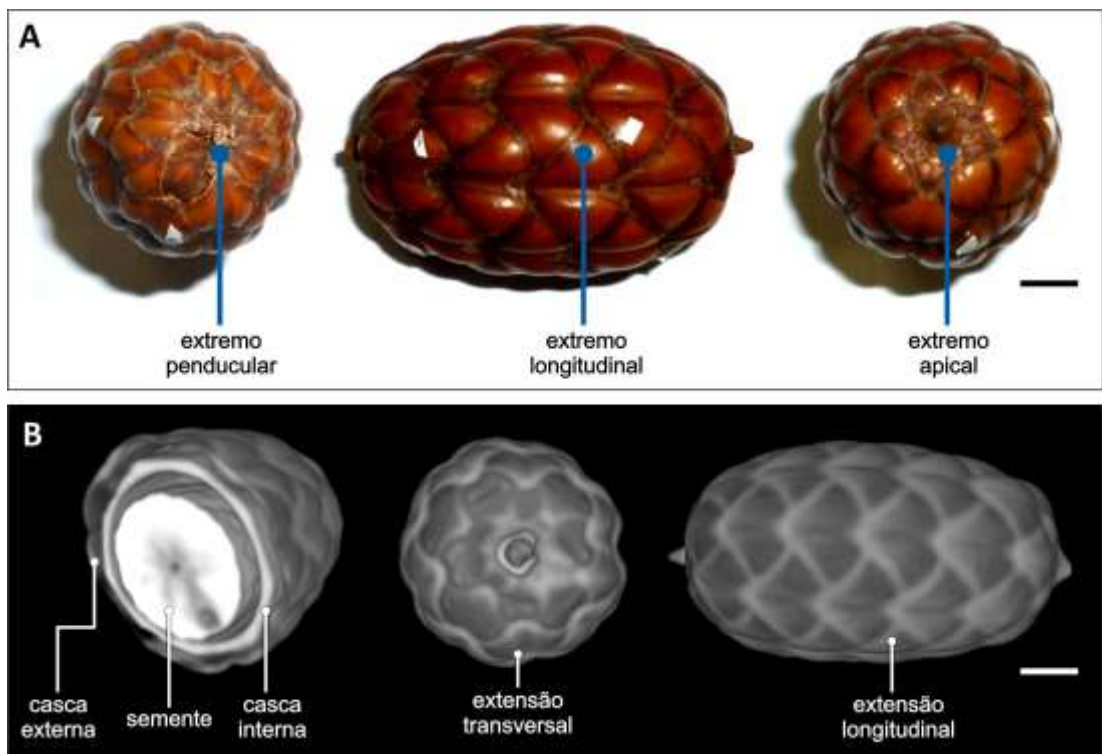
Fonte: Elaborado pelos Autores.

As formas encontradas nos elementos da natureza em foco apresentam superfícies externas em cascas, folhas, flores e frutos com diferentes texturas. Após observar a superfície de alguns frutos, optou-se pelo fruto de uma palmeira que apresenta características biomórficas com soluções de textura que contribuem para o enrijecimento da superfície, lembrando as características delgadas com materiais desenvolvidos pela indústria no desenvolvimento de determinados painéis. A palmeira, popularmente conhecida por Jupati (*Raphia taedigera* Mart.) possui pouca altura, com folhas grandes e muito compridas. Cresce nos terrenos alagados pela maré, na beira dos rios e nas ilhas baixas do norte do Brasil até a América Central (LORENZI,

2010).

O fruto de *R. taedigera* possui forma cilíndrica oval e arredondada nas extremidades (Figura 8), tem o volume que se assemelha a um ovo de galinha, com cerca de quatro a sete centímetros de comprimento e três a quatro centímetros de diâmetro (Figura 8A). É constituído de um caroço da forma do fruto, duro, lenhoso, recoberto por uma casca na qual não adere. Esta casca é composta por uma massa amarela, oleosa, recoberta por uma epiderme formada de escamas duras, lustrosas e de tonalidade vermelho-escuro, que se torna marrom ao amadurecer. O peso médio de um fruto de Jupati é de 45 g. É composto de 27,1% de casca externa escamosa, 23,1% de massa oleosa da casca e 49,8% de caroço lenhoso (PESCE, 2009). Possui cascas de paredes finas que observam vincos formando texturas ou linhas de dobras, retas ou curvas, visam satisfazer propriedades mecânicas de resistência.

Figura 8: Fruto da palmeira Jupati (*R. taedigera* Mart.): (A) aspectos gerais da casca externa; (B) imagem de tomografia computadorizada com vista em corte. Escala: 10 mm.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Além de uma observação da superfície externa do fruto da palmeira Jupati, por meio de fotografia, foi empregada a técnica de tomografia computadorizada (CT). A técnica utiliza projeções radiográficas no comprimento de onda de Raios X no objeto a ser digitalizado, permitindo sua reconstrução interna virtual realizada em 3D, de maneira não invasiva (PALOMBINI et al., 2017). Para o estudo, a amostra foi tomografada com um equipamento de CT modelo Discovery CT750 HD (GE® Healthcare, Milwaukee, WI, EUA), utilizado como scanner para estudos clínicos. A corrente e tensão do tubo de Raios X foi de 260 mA e 140 kV, respectivamente, com projeções helicoidais resultando em 243 fatias com tamanho de pixel de 0,1563 mm. A aquisição das tomografias resultou em fatias que foram exportadas e combinadas utilizando o *software* de acesso aberto Fiji, uma distribuição do ImageJ (PALOMBINI et al., 2018). O *software* permite a

utilização de plugins para edição e visualização 3D de imagens sequenciais, como as obtidas por CT, além da realização de operações quantitativas e exportações para diversos formatos de arquivos (PALOMBINI et al., 2020). A Figura 8B apresenta imagens resultantes da reconstrução 3D do fruto digitalizado por CT, evidenciando uma visualização em corte axial, apresentando os aspectos internos das cascas externa e interna, e da semente, bem como os aspectos externos. Deste modo, é possível afirmar que dentre as atuais técnicas de digitalização de objetos, os métodos baseados em tomografia computadorizada ganham bastante destaque por ser realizada de maneira não-invasiva, permitindo a visualização tanto da superfície externa quanto de detalhes internos de uma amostra, e possibilitando a compreensão de seus atributos morfológicos de maneira intacta, preservando a sua configuração natural. Amostras de diferentes tamanhos podem ser analisadas, graças à variação de tipos de equipamentos e resoluções espaciais disponíveis.

Pelas imagens obtidas, percebe-se que a textura da uma superfície possui aspecto bem determinado pelos componentes da casca externa, contendo, também, alto brilho e reflexão. Tais propriedades são interessantes de serem aplicadas em fachadas devido a um possível controle de temperaturas e gastos de energia. Também é observado que a casca externa é caracterizada por ser de espessura bastante fina, apesar de se mostrar com boa rigidez. Provavelmente, deve-se à sua geometria específica escamosa, a qual também pode ser explorado em projeto bioinspirado para envelopes de edificações.

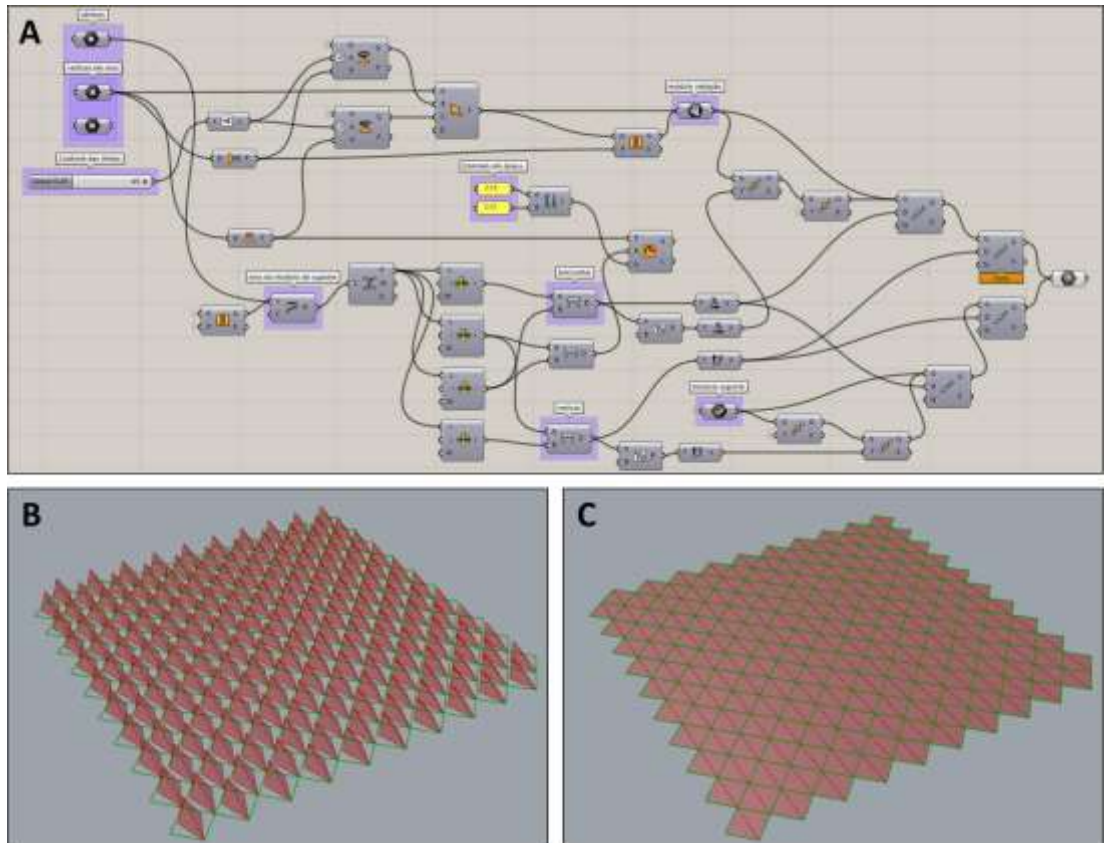
Uma definição de parâmetros e das condições envolvidas nos esquemas paramétricos para criar regras dentro de uma linguagem formal a partir da morfologia deste fruto de casca dura serve para alternativas de soluções. A apresentação da modelagem visual bidimensional ou a construção de modelos tridimensionais demonstram soluções de design dentro de um mesmo estilo, trazendo uma percepção visual na transformação das formas. Por outro lado, a implementação de um modelo parametrizado que automatiza o processo de geração de formas enfatiza a variação de soluções a partir do controle de determinados parâmetros. Considerando os parâmetros encontrados estudam-se as possibilidades de aplicação em soluções de produtos e gerando formas parametrizadas (Figura 9).

Para a execução de elementos que permitam movimentação, cinéticos portanto, em uma determinada superfície de revestimento, como uma fachada, é necessário simular as diferentes posições dos elementos móveis que a compõe. Para a elaboração e as simulações que permitam a construção de um sistema mecânico associados a automatização e mudança de posições de elementos constitutivos de uma superfície, neste caso de uma fachada, foram empregadas rotinas de modelagem paramétrica através do *software* Grasshopper®, que opera com uma linguagem de programação que possibilita desenvolver códigos de forma visual. Esta apresentação facilita a organização de códigos complexos de maneira mais objetiva e, em tempo real, acompanhar o trabalho desenvolvido ao mesmo tempo em que as rotinas vão sendo construídas. Também auxilia na fácil localização de eventuais erros os quais podem ser corrigidos e visualizados, assim como possibilita a implementação de automações mecânicas reais que futuramente poderão ser adotadas.

Outras vantagens que justificam a implementação destes códigos por modelagem paramétrica seriam: a possibilidade de desenvolvimento de estratégias generativas através da manipulação de um ou mais aspectos dos parâmetros e a variação de formas que atendam determinadas características previamente elaboradas e grande variedade de soluções que podem ser geradas e otimizadas. Ferramentas digitais mais recentes desempenham um papel relevante na concepção, análise e produção de formas. As abordagens de design baseadas em computação promoveram a exploração de design e o surgimento de formas e padrões complexos, o que seria

difícil e oneroso produzir sem eles (MONEO, 2001). Dentro do domínio arquitetônico, por exemplo, essas abordagens têm grande aplicação no desenvolvimento de fachadas de edifícios devido à estética e relevância ambiental destes últimos, uma vez que estes medeiam o interior e o exterior de um edifício (ALFARIS & MERELLO, 2008).

Figura 9: Geração de formas tridimensionais a partir da parametrização da geometria escolhida: (A) Código paramétrico do Grasshopper®; (B) Simulação do código com aletas abertas, e (C) fechadas.



Fonte: Elaborado pelos Autores.

A partir de parametrizações bi e tridimensionais é possível a geração de uma ampla variedade de padronagens. Por exemplo, superfícies poderiam ser projetadas levando em conta somente questões estético-formais, questões funcionais ou ambos estético-funcionais. Parametrizações mais complexas, como para aplicações em estruturas cinéticas, podem contar com o uso de sensores que respondem quando certas mudanças ocorrem naturalmente no ambiente ao seu redor (por exemplo, luz do dia e movimento). Desta forma o recurso de simulações deste movimento e seu percurso precisa de alternativas que associam o desenho a parâmetros dinâmicos. Os chamados parâmetros responsivos, elevam o grau de possibilidades de um elemento de revestimento, como o de fachadas de uma edificação por exemplo, dado que tais estruturas aumentam o grau de flexibilidade, uma vez operadas (manualmente ou sob comando de ações computadorizadas) podem permitir que a arquitetura se adapte às várias mudanças no ambiente (luz, chuva, vento, etc.).

6. Considerações Finais

Inspirar-se na natureza, como por exemplo os estudos da textura de determinados frutos, os quais estão sujeitos diretamente a fatores bioclimáticos, é uma possibilidade para aprofundar saberes que vão além de aplicações da biomorfose. Sendo assim, é possível afirmar que o método de investigação proposto neste trabalho, permite ao projetista explorar novas configurações aplicadas às superfícies, apoiando-se em novas competências advindas da integração entre ciência, tecnologia, engenharia, arte e matemática (STEAM). Abordar o desafio da projeção desta forma conjunta é um caminho interessante para avançar no campo interdisciplinar tão importante na atual sociedade do conhecimento. As tecnologias aqui utilizadas não são imperativas para se trabalhar com a área de biônica, porém elas permitem um aprofundamento investigativo e uma cientificidade da matéria. Soluções podem ser encontradas com a infraestrutura disponível e os recursos de cada grupo de pesquisa para abordar a temática em vários níveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

ABZHANOV, A. The old and new faces of morphology: the legacy of D’Arcy Thompson’s ‘theory of transformations’ and ‘laws of growth’. **Development**, v. 144, n. 23, p. 4284–4297, 1 dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1242/dev.137505>

ALFARIS, Anas. **Emergence Through Conflict: The Multi-Disciplinary Design System (MDDS)**. Ph D Thesis in Computation for Design and Optimization. Massachusetts Institute of Technology - MIT, 2009. 430 p.

ALFARIS, A; MERELLO, R. **The Generative MultiPerformance Design System**. ACADIA 08 › Silicon + Skin › Biological Processes and Computation, 2008. pp. 448- 457

BADARNAH, L. Form Follows Environment: Biomimetic Approaches to Building Envelope Design for Environmental Adaptation. **Buildings**, v. 7, n. 4, p. 40, 12 maio 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings7020040>

BADARNAH, L. **Environmental adaptation of buildings through morphological differentiation: a biomimetic approach** **Environmental adaptation of buildings through morphological differentiation**. Advanced Building Skins 2018. Anais... Bern, Switzerland: 1 out. 2018

BEESELY, Philip; HIROSUE, Sachiko and RUXTON, Jim. **Toward Responsive Architectures**. Responsive Architectures: Subtle Technologies. Eds. Philip Beesley, Sachiko Hirose, Jim Ruxton, M. Trankle and C. Turner. Toronto: Riverside Architectural Press, 2006. Print. 3-11.

BETANCOURT, M. C; QUINTERO, L. M.; CERECEDA, G. **A Discussion On Algorithmic Thinking Product Design Process**. DS 77: Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference. 2014.

BERTHIER, Jean. Véhicules et routes. In: **Journal Techniques de l'ingénieur**. Editions T.I. France, 1991.

- CENANI, Sehnaz; CAGDAS, G. **Shape Grammar of Geometric Islamic Ornaments**. In Proceedings of the 24th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe), Volos, Greece, 2006. (pp. 290-297).
- DONDERO, Maria Giulia. La sémiotique visuelle entre principes généraux et spécificités. In : **Nouveau Actes Sémiotiques**, Presses Universitaires de Limoges. Février, 2010.
- GAGO, R. M. Architectural Design through the Geometrical Principles of Biological Growth. **Periodica Polytechnica Architecture**, v. 47, n. 1, p. 8–13, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPar.9891>
- HARALICK, Robert M. **Statistical and structural approaches to texture**. Proceedings of the IEEE, Vol. 67, No. 5, 1979.
- HSUAN-AN, Tai. **Sementes do cerrado e design contemporâneo**. UCG, Goiânia, 2002. 219 p.
- KINDLEIN JÚNIOR, W.; GUANABARA, A. S. Methodology for product design based on the study of bionics. **Materials & Design**, v. 26, n. 2, p. 149–155, abr. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.05.009>
- KNIGHT, T. Shape grammars in education and practice: history and prospects. In: **The International Journal of Design Computing**, 2, 1999.
- LORENZI, Harri. **Flora Brasileira - Arecaceae (palmeiras)**. São Paulo: Plantarum, 2010. 368 p.
- LORENZI, Marcella Giulia; SCHIAVELLO, Francesco. **Nature Inspired Architectures And Jewels Parametric Design**. Proceedings, 17th Conference on Applied Mathematics – APLIMAT 2018 First edition. Slovak University of Technology in Bratislava in publishing house, 2018.
- LOPEZ, Marlen; CROXFORD, Ben; RUBIO, Ramón; MARTÍN, Santiago; JACKSON, Richard. **Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles**. Conference: ICAE 2015 VII Congreso Internacional de Envolventes Arquitectónicas, Journal of Facade Design and Engineering, vol. 3., no. 1, 2015.
- MANZINI, Ezio. **A matéria da invenção**. Editora Centro Português de Design. Portugal, 1993.
- MONEO, R., **The Thing Called Architecture**. In C. Davidson, ed. Anything. New York: Anyone Corporation, 2001. pp. 120–123
- PALOMBINI, F. L. et al. Design, biônica e novos paradigmas: uso de tecnologias 3D para análise e caracterização aplicadas em anatomia vegetal. **Design e Tecnologia**, v. 7, n. 13, p. 46–56, 30 jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.23972/det2017iss13pp46-56>
- PALOMBINI, F. L. et al. Materiais e Biônica: sob a Ótica da Análise de Elementos Finitos Baseada em Imagens de Microtomografia de Raios X. In: ARRUDA, A. J. V. (Ed.). **Métodos e Processos em Biônica e Biomimética: a Revolução Tecnológica pela Natureza**. São Paulo: Editora Blucher, 2018. p. 245–260. DOI: <https://doi.org/10.5151/9788580393491-15>
- PALOMBINI, F. L. et al. Combining numerical models and discretizing methods in the analysis of bamboo parenchyma using finite element analysis based on X-ray microtomography. **Wood**

Science and Technology, v. 54, n. 1, p. 161–186, 14 jan. 2020. DOI:
<https://doi.org/10.1007/s00226-019-01146-4>

PESCE, C. **Oleaginosas da Amazônia**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, Núcleo de Estudos Agrários e Desenvolvimento Rural, 2009. 334p

SCHUMACHER, Patrik. **Design as 2nd Nature**, London 2018 Published in: Zaha Hadid Architects – Diseno como segunda naturaliza. Exhibition catalogue: MUAC – El Museo Universitario Arte Contemporaneo, Mexico City, 2018.

STINY, George, Introduction to shape and shape Grammar. Environmental and Planning B, vol. 7, pp. 343–351, 1980.

TEPAVCEVIC, Bojan; STOJAKOVIC, Vesna. Shape Grammar in contemporary architectural theory and design. **Architecture and civil engineering**. Vol. 10. Nr. 2, 2012. P. 169 – 178

THOMPSON, D’Arcy Wentworth. **On Growth and Form**. Cambridge, UK: University Press, 1917.

VILLAFANE, Justo; MINGUEZ, Norberto. **Principios de Teoría General de la Imagen**. Ediciones Pirámide. Madrid. 2002.

WONG, Wucius. **Princípios de Forma e Desenho**. Martins Fontes, 2ª ed. São Paulo. 2001.