REVISTA DESIGN & TECNOLOGIA
ISSN: 2178-1974
2019, Vol. 09, No. 18
DOI 10.23972/det2019iss18pp22-31

PGDESIGN
www.pgdesign.ufrgs.br

Coluna Errante: Um Experimento Morfogenético de Otimização Estrutural pelo Comportamento de Agentes Autônomos

Guilherme Giantini[1]; Gabriela Celani[1];

1 *Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil*

RESUMO

A Natureza é um tema recorrente como inspiração para a produção de artefatos humanos. Contudo, desde o início do século passado, essa inspiração em sistemas biológicos, que costumava ser apenas visual, passou gradualmente a ser substituída pelo uso de estratégias, lógicas e funcionamento dos sistemas naturais em analogias projetuais mais aprofundadas, consistentes e direcionadas à sustentabilidade. Mais recentemente, as tecnologias digitais de projeto e fabricação foram introduzidos no processo de concepção e produção arquitetônica, o que contribuiu ainda mais para o surgimento de uma abordagem análoga a processos encontrados em sistemas naturais. A compreensão mais aprofundada dos processos naturais de crescimento e desenvolvimento de sistemas naturais permite entender que a Natureza fornece orientação não apenas para o desenvolvimento de soluções técnicas bio-inspiradas, mas também para a elaboração de estratégias e metodologias biomiméticas de projeto. Tais metodologias procuram emular processos naturais que produzem, elaboram e mantêm a forma, a estrutura e os padrões de comportamento de sistemas biológicos. A aplicação de processos biomiméticos para a geração de formas a partir da união entre a estrutura e o comportamento do sistema por meio de modelos computacionais de crescimento e desenvolvimento é denominada por alguns autores de abordagem morfogenética. Esta é reconhecida como uma abordagem integrada de projeto que considera a organização material, as ferramentas de fabricação e o contexto ambiental como diretrizes da síntese morfológica. Um dos possíveis métodos de aplicação morfogenética é o Agent-based System, um instrumento de processamento de dados baseado no comportamento autônomo de agentes naturais. O objetivo deste artigo é descrever a incorporação desse método no processo de projeto morfogenético de uma coluna com desempenho estrutural. A base metodológica empregada é a pesquisa exploratória, caracterizada pela revisão sistemática da literatura, análise e síntese dos dados coletados e realização de experimentos de aplicação. A elaboração do experimento incorporou princípios naturais de crescimento e desenvolvimento por meio do sistema de agentes autônomos, cujos parâmetros comportamentais relativos à forma foram associados a parâmetros de análise estrutural por meio de um algoritmo evolutivo a fim de otimizar a eficiência estrutural do sistema. Este experimento pode ser compreendido como um incentivo a abordagens de projeto computacional sustentável que empregam metodologias capazes de analisar e otimizar resultados a partir de critérios de desempenho.

PALAVRAS-CHAVE

Projeto Morfogenético, Biomimética, Agent-based Systems, Algoritmo Evolutivo, Desempenho Estrutural.

Wandering Column: A Morphogenetic Experiment on Structural Optimization by Autonomous Agents' Behavior

ABSTRACT

Nature is a recurrent theme as inspiration for the production of human artifacts. However, since the beginning of the twentieth century, this inspiration in biological systems, which used to be only visual, has gradually been replaced by the use of strategies, logics and operation of natural systems in order to develop deeper, consistent and sustainability-oriented design analogies. Recently, digital design and fabrication technologies were introduced in the architectural conception and production processes, which contributed to a greater integration of design processes. This supports the emergence of a design approach related to processes found in Nature. An in-depth understanding of the processes of natural growth and development enables the comprehension that Nature provides not only instructions for the development of bio-inspired technical solutions, but also for the production of biomimetic design strategies and methodologies. These methodologies focuses on emulating natural processes that are able to devise, generate and maintain the form, structure and behavioral patterns of biological systems. The implementation of biomimetic processes for the generation of form by linking the system's structure and the behavior through computational models of growth and development is considered a morphogenetic design approach by some authors. Computational morphogenesis is acknowledged as an integral design methodology that take material organization, manufacturing tools and contextual environment as guidelines for morphological synthesis. One of the possible morphogenetic methods is the Agent-based System, a data processing computational tool based on natural agent's autonomous behaviors. This paper's aim is to describe the implementation of Agent-based Systems into the morphogenetic design process of a structural performance-based experimental column. The methodological basis employed is the exploratory research, which encompasses a literature systematic review, analysis and synthesis of the collected data, as well as the implementation of design experiments. The design application took natural principles of growth and development from the Agent-based system, which behavioral patterns related to the system's morphology were associated to structural analysis parameters by an evolutionary algorithm in order to optimize the system's structural efficiency. This design experiment can be taken as a promotion of sustainable computational design approaches that employ analysis and optimization methods towards performance-based design results.

KEYWORDS

Morphogenetic Design; Biomimetics; Agent-based Systems; Evolutionary Algorithm; Structural Performance.

CONTATO: Guilherme Giantini – *giantinigui@gmail.com*

© 2019 – Revista Design & Tecnologia

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tecnologias digitais de projeto e fabricação foram introduzidos no processo de concepção arquitetônica, permitindo uma maior integração e um fluxo direto entre o que pode ser projetado e o que pode ser fabricado, por meio de colaborações interdisciplinares entre profissionais (KOLAREVIC, 2003, 2008). Essas tecnologias também possibilitam o desenvolvimento de processos e métodos com diferenciação geométrica de componentes construtivos (KNIPPERS; SPECK; NICKEL, 2016), bem como a priorização das características dos materiais para definir o sistema estrutural e, então, a forma (OXMAN; OXMAN, 2010).

Somando-se ao desenvolvimento destes métodos, a crescente crise ligada a questões do meio ambiente e o reconhecimento das falhas de desempenho ambiental na prática tradicional de projeto impulsionaram o surgimento de uma abordagem projetual mais informativa, culminando em uma mudança de paradigma (OXMAN, 2010; STEADMAN, 2008). Teorias e práticas contemporâneas de arquitetura têm focado em questões de desempenho (estrutural, construtivo, econômico, ambiental, entre outros) com o objetivo de promover o uso mais integrado, inteligente e eficiente de recursos materiais ao invés de priorizar razões estéticas, como muito recorrente no Pós-Modernismo (LEACH, 2009).

A abordagem integrada de projeto é comumente desconsiderada pelos métodos tradicionais de projeto e produção (OXMAN, 2013). Entretanto, ela é observada no mundo dos organismos naturais, constituídos por estruturas hierárquicas (WEGST et al., 2014)e interdependentes entre si. Isto corrobora para a troca de informações direta entre os campos científicos da Arquitetura e da Biologia (AHLQUIST et al., 2015).

Recorrer à Natureza, ou aos mecanismos e estratégias dos processos biológicos tem sido um tema recorrente na história da Arquitetura (BAHAMÓN; PÉREZ; CAMPELLO, 2008; STEADMAN, 2008) e remonta a períodos como a Antiguidade Clássica ou o Renascimento, sendo exemplificado pelos trabalhos de Aristóteles, Vitrúvio (AHMED, 2015) e Leonardo da Vinci (SEIREG, 1969), respectivamente. Além de fonte de inspiração para representações visuais e formais, a Natureza também serviu de base para analogias filosóficas.

Hoje, os organismos vivos são considerados sistemas que adquirem suas formas complexas e padrões de comportamento através de interações entre seus componentes internos (MENGES; WEINSTOCK; HENSEL, 2010), forças físicas externas e pressões ambientais diversas (THOMPSON, 1942) através de um processo biológico no qual tanto o crescimento quanto o desenvolvimento evolutivo são associados de forma integrada. (MENGES; WEINSTOCK; HENSEL, 2010). A compreensão mais aprofundada dos processos naturais permite entender que a Biologia fornece orientação não apenas para o desenvolvimento de soluções técnicas bio-inspiradas, mas também para a elaboração de estratégias e metodologias biomiméticas de projeto. Tais metodologias procuram emular processos naturais que produzem, elaboram e mantêm a forma, a estrutura e os padrões de comportamento de sistemas biológicos, dando enfoque à integração entre a forma, o processo e o ecossistema (BENYUS, 1997). A manutenção desses sistemas se dá não apenas pela adaptação evolutiva, mas também pela alteração de determinados aspectos comportamentais. Desta maneira, a forma e o comportamento estão intrinsecamente ligados (MENGES; WEINSTOCK; HENSEL, 2010; PEDERSEN ZARI, 2007): as características morfológicas de um organismo são afetadas pelo seu comportamento em determinado ambiente e diferentes comportamentos podem gerar formas diferentes em função das variações de condicionantes de um ambiente (MENGES; WEINSTOCK; HENSEL, 2010).

Portanto, a aplicação de processos biomiméticos para a geração de formas com o objetivo de unir a estrutura e o comportamento pelo uso de modelos computacionais de crescimento e desenvolvimento embrionário (MENGES; WEINSTOCK; HENSEL, 2010) pode ser considerada uma abordagem morfogenética (TESTA, 2018).

Atualmente, no campo das Ciências Biológicas, a morfogênese é um ramo da Biologia do desenvolvimento que abrange um amplo escopo de processos biológicos, abordando a questão da forma biológica em muitos níveis, desde a estrutura das células individuais, a formação de agrupamentos celulares e tecidos multicelulares, até a formação de tecidos de maior complexidade em órgãos e organismos (IÇMELI, 2014). Estratégias morfogenéticas de projeto promovem a combinação e a integração entre simulações estruturais e de comportamento de materiais sob a ação da gravidade e de forças adicionais. A abordagem morfogenética é parte do entendimento contemporâneo sobre a Natureza, no qual há uma mudança de "analogia" para "modelo"; de natureza como "fonte de formas a serem copiadas" para natureza como "uma série de processos dinâmicos inter-relacionados que podem ser simulados e adaptados para o projeto e produção arquitetônica" (WEINSTOCK, 2010).

O projeto morfogenético é reconhecido como um método computacional de projeto integrado que considera a organização material, as ferramentas de fabricação e o contexto ambiental como diretrizes da síntese morfológica. Um dos possíveis métodos de aplicação morfogenética é o *Agent-based System* (BAHARLOU; MENGES, 2015), um método computacional de processamento de dados baseado no comportamento autônomo de agentes naturais.

O objetivo do artigo é descrever a incorporação do *Agent-based System* como método de geração da forma no processo de projeto de uma coluna experimental com desempenho estrutural, utilizando a abordagem morfogenética.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O projeto de inspiração biológica, bem como o campo de pesquisa mais abrangente que o enquadra, o *Design-by-Analogy*, é historicamente reconhecido como base para diversas inovações (FU et al., 2014). O desenvolvimento da pesquisa em história natural do século XVIII foi marcada pelo surgimento de métodos classificatórios de espécies animais e vegetais. Isso possibilitou o estabelecimento de um paralelo entre a Biologia e a história e teoria de Arquitetura. Entre o final do século XVIII e o início do século XIX, começam a surgir as primeiras analogias biológicas no campo da arquitetura. A análise e o mimetismo formal da Natureza por parte de arquitetos e designers atingiu um grande reconhecimento com o estilo *Art Nouveau* na França e seus desdobramentos pela Europa no final do século XIX (AHMED, 2015).

O interesse na natureza esteve presente, ainda que em menor expressão, na arquitetura do início do século XX. Isto é notado nos trabalhos de arquitetos proeminentes como Frank Lloyd Wright, Alvar Aalto e até mesmo Mies van der Rohe, por seu foco na integração de espaços internos e externos, uso de materiais naturais, expressão da estrutura e por considerar a arquitetura como uma parte de um todo maior, pelo menos de seu entorno imediato (MYERS, 2012).

De maneira menos retórica, outros arquitetos do século XX buscaram abordar a inspiração na Natureza mais diretamente. A partir da análise de estruturas animais e vegetais, o arquiteto catalão Antoni Gaudí projetou os primeiros e mais consagrados exemplos de suportes estruturais como estruturas ramificadas para a sustentação das abóbadas

hiperboloides entrelaçadas (RIAN; SASSONE, 2014) de concreto da Sagrada Família (YELER, 2015).

Na década de 1970, Frei Otto e sua equipe de pesquisa no *Institute for Lightweight Structures* da Universidade de Stuttgart desenvolveram experimentos com o objetivo de alcançar o máximo de eficiência estrutural utilizando técnicas de projeto onde a forma surge do comportamento do material em resposta às cargas estruturais às quais o sistema é submetido. Apesar da limitação do escopo e impacto dos experimentos em função da não incorporação de ferramentas computacionais no processo (OXMAN, 2010), Otto é considerado um pesquisador importante no assunto da inspiração biológica no projeto arquitetônico. Em seus experimentos, o resultado não se dá por mimese formais, mas por um processos análogos a fenômenos naturais.

A influência do desenvolvimento das ciências biológicas causou grande impacto no campo projetual de arquitetura e design, de modo que, com a disseminação das teorias de Charles Darwin no final do século XIX e com a pesquisa do DNA e da cibernética em meados do século XX (DICKINSON; WATCHER, 2014). Conforme a progressão da fundamentação teórica a respeito do crescimento e desenvolvimento dos sistemas naturais, tornou-se mais compreensível observar atentamente as estratégias, mecanismos e demais soluções de alto desempenho encontradas na Natureza, corroborando para o surgimento abordagens e metodologias como o projeto morfogenético.

2.1 Projeto morfogenético

A metodologia computacional de projeto morfogenético é fundamentada na teoria da morfogênese natural, introduzida pela primeira vez pelo biólogo e matemático D'Arcy Wentworth Thompson (MITCHELL, 2008; STEADMAN, 2008). Em *On Growth and Form* (1942), o autor teorizou a geração de formas na Natureza como a organização material sob forças físicas, ou morfogênese (THOMPSON, 1942). Thompson explica que a chave para entender o crescimento biológico está na compreensão das forças físicas (THOMPSON, 1942; THOM, 1975 apud OXMAN, 2013) que operam entre as subestruturas materiais durante o processo de crescimento em combinação com forças internas do sistema biológico, determinando escalas, limites espaciais e a informação da geometria do desenvolvimento até a fase adulta do indivíduo (WEINSTOCK, 2010).

As ideias de Thompson (1942) sobre o crescimento e desenvolvimento biológico logo foram incorporadas pela matemática, onde a materialidade e a fisicalidade foram perdidas para a abstração numérica. Em 1952, Alan Turing, matemático e pioneiro da Ciência da Computação, publicou o artigo *The Chemical Basis of Morphogenesis* no qual propôs um modelo matemático que compreendia a relação entre a forma e a matéria como uma ruptura de um sistema estável, ocasionando o seu desenvolvimento em um novo padrão ou estrutura (TURING, 1952).

Na arquitetura, os primeiros desenvolvimentos sobre a criação de formas fundamentadas no crescimento de desenvolvimento de organismos naturais não empregavam metodologias computacionais. Eram muitas vezes analogias visuais superficiais (STEADMAN, 2008) e passíveis de inconsistências diversas.

A intersecção entre Arquitetura e Biologia é uma estratégia vantajosa (ROUDAVSKI, 2009) e indica um paradigma promissor para a inovação projetual e para o design sustentável (HELMS; VATTAM; GOEL, 2009) e ecológico (OXMAN et al., 2015; ROUDAVSKI, 2009), uma vez que se torna possível criar materiais, estruturas, métodos, ferramentas, mecanismos e sistemas de projeto extremamente eficientes. À medida que o conceito e a prática do projeto sustentável se tornam cada vez mais aceitos, novas abordagens, como a Biomimética, estão sendo criadas e aperfeiçoadas rumo a um futuro sustentável (BENYUS, 1997) por economia material, maior resistência de materiais, menos desperdício e outros fatores. Soluções que ignoram a relação complexa entre o ser humano e o ambiente não se mostram consistentes quanto ao desempenho sustentável (KLEIN, 2009).

Fica claro, portanto, que as Ciências Biológicas fornecem uma das maiores fontes de inspiração para o desenvolvimento de modelos de projeto a partir de fenômenos presentes na natureza, como a morfogênese (LEACH, 2009). A aplicação de estratégicas e operações características da morfogênese natural como uma estrutura conceitual de projeto computacional traz benefícios ao projeto arquitetônico, uma vez que este tem como objetivo resolver desafios que já foram resolvidos pela natureza. O estudo aprofundado sobre o tema da morfogênese na Arquitetura permitiu a diversos pesquisadores estruturar os conceitos que a fundamentam. Mesmo não havendo uma convenção sobre esse assunto, são notados as principais diretrizes morfogenéticas advindas do campo da Biologia do Desenvolvimento (OXMAN, 2009):

- crescimento (LEACH, 2009) de uma instância individual (MENGES, 2007);
- diferenciação (LEACH, 2009) ou o aumento da diversificação estrutural dos conjuntos e subconjuntos de um sistema material gerado em função das relações e demandas externas (MENGES, 2011);
- adaptação (OXMAN, 2009; ROUDAVSKI, 2009) ou a resposta a alterações ambientais, tanto por ajustes comportamentais de elementos do sistema quanto por mudanças genéticas das populações, via reprodução e seleção natural (AHMAR, 2011);
- auto-organização (OXMAN, 2009; ROUDAVSKI, 2009) ou a capacidade de adaptação na presença de mudanças e a habilidade de responder a estímulos do ambiente (HENSEL, 2006);
- emergência (OXMAN, 2009; ROUDAVSKI, 2009) resumido como um conjunto de modelos e processos *bottom-up* para a criação de sistemas artificiais projetados para gerar formas e comportamentos complexos (HENSEL; MENGES; WEINSTOCK, 2004), e
- desenvolvimento evolutivo (MENGES, 2007; OXMAN, 2009) do sistema através de gerações de populações de instâncias individuais, considerando a relação entre o conjunto de dados interno ou regras de crescimento (características genotípicas) e a sua interação com o ambiente, resultando em instâncias fenotípicas (MENGES, 2007).

A compreensão dessas diretrizes como estrutura conceitual fundamenta a transposição dos conceitos naturais para o ambiente artificial computacional, definindo modelos projetuais capazes de gerar estruturas complexas, funcionais e de alto desempenho. Definida essa estrutura conceitual, um dos desafios de materialização prática é o desenvolvimento de métodos e ferramentas computacionais que possam tornar tal abordagem reproduzível e implementável (GOEL; MCADAMS; STONE, 2014), uma vez que a estrutura prática de modelos de projeto inspirados na natureza é aberta, não existindo processos normativos, convencionais ou especificamente estruturados e rígidos para tais práticas computacionais (HELMS; VATTAM; GOEL, 2009).

Ao priorizar a representação do processo de projeto e minimizar reproduções visuais, o projeto morfogenético questiona métodos tradicionais de projeto. Se por um lado ambos lidam com a prática material, por outro lado eles divergem quanto à relação entre formação e materialização. Ou seja, os métodos tradicionais de projeto arquitetônico não integram forma e material no momento de sua concepção, estabelecendo uma hierarquia de importância, onde há a priorização da representação da forma antes de sua materialização (MENGES, 2007; OXMAN, 2010).

Menges sugere uma metodologia prática de projeto morfogenético (Figura 1) cujos resultados apresentam complexidade morfológica e qualidades de desempenho ambiental oriundas de um processo de projeto integrado de formação, materialização (MENGES, 2007), desenvolvimento e crescimento de forma adaptativa, gerando sistemas de organização complexa em função da interação sistemática entre capacidades materiais internas e forças ou pressões ambientais externas. Isto resulta em estruturas complexas e altamente funcionais, internamente organizadas através de séries sucessivas de subconjuntos propagados e diferenciados a partir dos quais as qualidades de desempenho do sistema surgem (MUELLER; NEWMAN, 2003). Da transposição do modo de operação da morfogênese natural para a computacional, é necessário que se preservem as seguintes características principais dentro do processo de projeto: priorização do material e de suas propriedades físicas, condicionantes de manufatura e fabricação, desempenho estrutural e ambiental, e conceitos de crescimento e desenvolvimento evolutivo do sistema (MENGES, 2007).

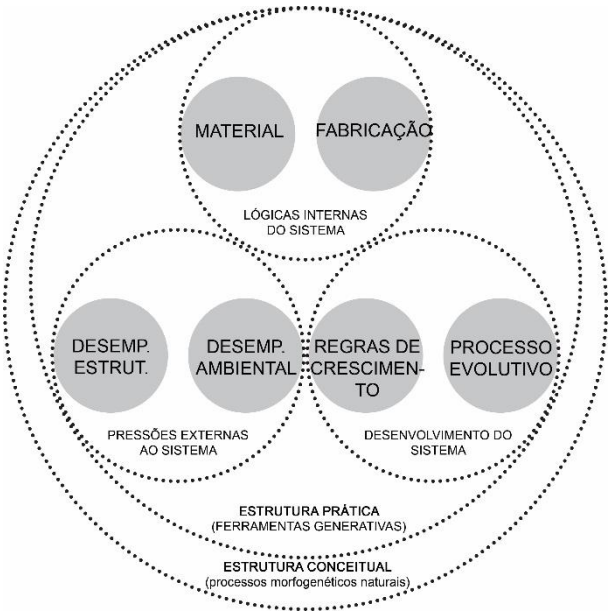


Figura 1 Estrutura prática de projeto morfogenético computacional formulada por Achim Menges. Elaborado pelo autor em 2018 com base na leitura de Menges (2007).

2.2 Agent-based System

A síntese dos aspectos morfológicos demanda, portanto, a aplicação de um método de projeto integrado que considere a organização material, as ferramentas de projeto e os ambientes contextuais como diretrizes ativas em um processo de projeto *bottom-up* no qual a auto-organização dos elementos é capaz de gerar comportamentos adaptativos (BAHARLOU; MENGES, 2013) de forma a explorar complexidades emergentes e imprevisíveis. Um método capaz de integrar tais diretrizes em um processo computacional é o *Agent-based System* (BAHARLOU; MENGES, 2015), uma vez que este é um método de processamento de dados e informações (GILBERT, 2008).

Este método computacional consiste de uma coleção de entidades autônomas de tomada de decisão (BONABEAU, 2002) que seguem regras locais simples e interagem com um ambiente (GILBERT, 2008). O propósito deste método é a modelagem de heterogeneidades individuais que estão situadas em um ambiente e que têm a capacidade de decidir sobre suas regras integradas (GILBERT, 2008 apud BAHARLOU, 2017).



Figura 2 Colônia de formigas tecelãs construindo uma ponte: um exemplo de interação e auto-organização de agentes autônomos no processo de materialização, estruturação e formação naturais. Fotografia de Rose Thumboor. 2015. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Weaver_Ants_-_Oecophylla_smaragdina.jpg>

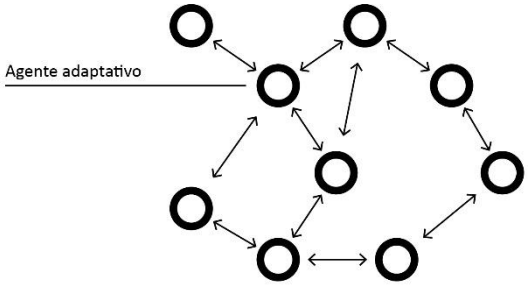


Figura 3 Representação gráfica de agente adaptativo em um *Complex Adaptive System*. Elaborado pelo autor com base na leitura de Holland (1995).

Apesar da necessidade de revisão terminológica em função das diversas aplicações em diferentes campos científicos, o termo "agente" comumente representa características essenciais como a autonomia e a adaptabilidade (BAHARLOU, 2017). Estes agentes são considerados dispositivos de processamento capazes de computar o meio e são usados para processar e sintetizar diversos fenômenos naturais. Eles são mais frequentemente usados na simulação computacional de eventos presentes no mundo físico e, portanto, são capazes de representar fenômenos ou sistemas para fins de experimentação ou construção de cenários (GILBERT, 2008) artificiais. A interação adaptativa entre diversos agentes autônomos pode ser entendida como um *Complex Adaptive System* (HOLLAND, 1995) (Figura 2), no qual o comportamento do sistema é distinto do comportamento das partes individuais (HOLLAND; MILLER, 1991), que incorporam estímulos ambientais de forma a desencadear os

comportamentos correspondentes (BAHARLOU; MENGES, 2015).

Os comportamentos dos agentes surgem de um conjunto de regras que definem suas estratégias frente a situações recorrentemente novas (HOLLAND, 1995). Além disso, tal conjunto de regras também define o comportamento dos agentes e guiam os processos de tomada de decisão. Os agentes podem modificar esse conjunto básico de regras com informações adquiridas do contexto ambiental e, assim, gerar novas regras (BAHARLOU; MENGES, 2015; CASTI, 1997), o que promove a ocorrência de adaptações dinâmicas (BAHARLOU, 2017).

Os processos de formação da morfogênese natural podem emergir dos comportamentos tanto individuais quanto coletivos dos agentes. Portanto, há duas categorias de morfogênese comportamental. A primeira categoria diz respeito ao papel dos agentes enquanto parte do padrão comportamental formado (por exemplo, uma colônia de formigas construindo uma espécie de ponte, como observado na (Figura 3). Na segunda categoria os agentes estão envolvidos no processo de geração da formas (por exemplo, uma ave construindo seu próprio ninho) (BONABEAU, 1997). Portanto, os agentes naturais contribuem para processos morfogenéticos como base do desenvolvimento de sistemas comportamentais nos quais os agentes mediam ativamente o processo de formação e materialização. As percepções etológicas quanto à mediação de agentes fornecem a noção de organizações nas quais os comportamentos dos agentes emergem tanto da reação aos estímulos ambientais quanto da reação a outros agentes adjacentes (BAHARLOU; MENGES, 2015).

3. METODOLOGIA

O presente artigo é parte de uma pesquisa de mestrado teórico-prática em desenvolvimento e adota como base metodológica a pesquisa experimental. O tema do projeto morfogenético é abordado tanto de maneira teórica quanto prática, havendo uma metodologia teórico-conceitual e uma metodologia prático-experimental.

A pesquisa exploratória busca encontrar maior conhecimento a respeito do assunto e seu planejamento é flexível, seguindo a sequência de levantamento bibliográfico por revisão sistemática da literatura, análise e síntese dos dados coletados e realização de experimentos de aplicação, fornecendo maior propriedade para descrever os procedimentos (GIL, 2002).

Este artigo descreve um dos experimentos morfogenéticos realizados durante a pesquisa supracitada e, portanto, enfoca os procedimentos prático-experimentais. Estes consistem na consulta à revisão sistemática da literatura a fim de localizar fenômenos físicos ou biológicos presentes em sistemas naturais possíveis de serem simulados por meio de modelos computacionais correspondentes com o intuito de solucionar um problema de projeto predefinido.

4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A pesquisa científica de mestrado que aborda metodologias teóricas e práticas descrita no item anterior embasou o desenvolvimento do experimento morfogenético apresentado neste artigo. Para o desenvolvimento do experimento apresentado neste artigo, foram adotados procedimentos teóricos e práticos a fim de estabelecer uma abordagem sistematizada e um registro do processo de projeto.

4.1 Procedimentos Teóricos

Os procedimentos teóricos consistem na realização de uma Revisão Sistemática da Literatura que adotou as seguintes etapas:

1. Identificação preliminar de conteúdo nas bases de dados online *CumInCAD*;
   1.1. Utilização das palavras-chave específicas *"morphogenesis"* e *"morphogenetic"*;
   1.2. Combinação das expressões *"computational"*, *"digital"*, *"design"* e *"architectural"* com as palavras-chave do passo anterior para refinar a busca;
   1.3. Análise da bibliografia dos artigos resultantes para se identificar novas fontes em potencial;
2. Identificação complementar de conteúdo nas bases de dados online *Scopus, ResearchGate* e *Web of Science;*
   2.1. Emprego do mesmo método de busca de artigos descrito nos itens 1.1, 1.2 e 1.3;
   2.2. Descarte de artigos considerados fora do escopo arquitetônico;
   2.3. Descarte de artigos já localizados na primeira identificação;
3. Consulta a livros específicos apontados nessa identificação de conteúdo;
4. Consulta ao *DSpace@MIT,* base de teses e dissertações do MIT, devido à grande incidência de autores que indicam a existência de estudos apronfundados sobre o tema nesse instituto.
5. Averiguação o nível de estudo sobre o assunto no Brasil por meio de uma consulta à base de teses e dissertações da USP, *Teses.Usp*.
6. Revisão crítica dos artigos, livros, teses e dissertações encontrados de forma a verificar empregos imprecisos do termo específico;
7. Classificação e comparação de cada publicação por critérios de enquadramento nos campos de *Bio-inspired Design*/Biomimética e Sistemas Generativos, e consistência de uso do termo;
8. Seleção de publicações com empregos e definições terminológicas consistentes, e
9. Análise crítica das publicações selecionadas de forma a verificar informações que gerem conhecimento específico sobre o tema, como a formulação de uma definição consistente com a literatura.

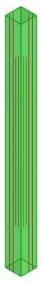


Figura 4 Etapa processual 1 – configuração geral da delimitação geométrica e espacial da coluna e das linhas-guia para posterior computação dos agentes autônomos.

A sistematização da busca resultou em 50 artigos cuja bibliografia foi analisada de forma a localizar novas fontes de informação tanto para a fundamentação teórica, como dissertações, teses e livros relacionados ao tema, quanto para as aplicações práticas.

Dos 50 artigos analisados, 8 se referem diretamente a métodos e estratégias de aplicação prática do projeto morfogenético, como Autômatos Celulares (ERIOLI; ZOMPARELLI, 2012; FISCHER; BURRY; FRAZER, 2003a, 2003b),

Adaptive Growth (DOUMPIOTI, 2008), Algoritmos genéticos e evolutivos (FOGED et al., 2012), Particle Systems (ERIOLI; ZOMPARELLI, 2012; RAMIREZ-FIGUEROA; DADE-ROBERTSON; HERNAN, 2013), *Differencial Growth* (NERLA; ERIOLI; GARAI, 2017), *Reaction Diffusion* (ERIOLI; ZOMPARELLI, 2012) e *Agent-based System* (BAHARLOU; MENGES, 2015).

É interessante notar que, através de uma observação cronológica das publicações que descrevem ou apenas mencionam os métodos morfogenéticos, as primeiras estratégias e serem discutidas nesse contexto foram os *L-Systems*, Autômatos Celulares, Algoritmos Genéticos e Evolutivos e Fractais, entre as décadas de 1990 e 2000. Do final desse período até a época atual, outras estratégias já conhecidas de outras disciplinas e incorporadas ao projeto morfogenético, como *Particle Systems*, *Differential Growth* e *Agent-based System*, passaram a estar presentes na pesquisa científica sobre o tema.

4.2 Procedimentos Práticos

Devido à atualidade, importância e recorrência do tema em diversos campos científicos (BAHARLOU, 2017), optou-se por utilizar o *Agent-based System* como parte da metodologia prática de um experimento de projeto morfogenético. O objetivo deste experimento foi utilizar o comportamento de agentes autônomos na definição geométrica de uma coluna, o que fez da eficiência estrutural o principal critério de projeto.

O experimento foi realizado dentro do ambiente de modelagem digital do software *Rhinoceros 3D* e de forma completamente associativa e paramétrica, utilizando a ferramenta de edição algorítmica *Grasshopper*. O projeto consiste de cinco etapas processuais: configuração geral, configuração do *Agent-based System*, análise estrutural, otimização e volumetria.

Na etapa de configuração geral, foram definidos os parâmetros iniciais da geometria, como posição inicial, seção da base, altura da coluna e demais informações relativas à a delimitação espacial (*bounding box*) da geometria em formato retangular. Com o intuito de direcionar verticalmente o caminho dos agentes do *Agent-based System*, foram estabelecidas linhas-guia. Cada superfície lateral da geometria inicial foi subdividida em quatro segmentos de reta. Com a finalidade de ocupação volumétrica não apenas nas regiões periféricas, mas em todo o contexto espacial, essas linhas-guia foram escaladas a partir do centro geométrico, preenchendo o interior da delimitação geométrica (Figura 4).

A segunda etapa processual do experimento diz respeito à configuração do *Agent-based System* e sua aplicação no processo de projeto como parte da metodologia morfogenética. A implementação desse sistema no ambiente de edição algorítmica do *Grasshopper* foi realizada a partir da incorporação do *add-on* Culebra 2.0, desenvolvido por Luis Quinones do grupo [n]igma + complicitMatter. O Culebra é uma biblioteca de comportamentos de objetos múltiplos computada em duas ou três dimensões. Escrita na linguagem de programação C#. Esta biblioteca foca em interações dinâmicas de sistemas híbridos de agentes múltiplos com recursos de visualização, dados e desempenhos personalizados.

O funcionamento deste sistema conta com a configuração dos agentes, dos comportamentos e dos recursos visuais. Na configuração dos agentes, são estabelecidos os parâmetros relativos à quantidade de agentes presentes no sistema e os parâmetros relativos à movimentação dos agentes, como velocidade inicial, velocidade máxima, força máxima e multiplicador de velocidade. Nesta etapa é possível escolher se a dimensão do sistema será bidimensional ou tridimensional, como é o caso deste experimento. Quanto aos comportamentos, são estabelecidas as configurações relativas ao rastreio (*tracking behaviour*) das linhas-guia definidas na etapa anterior, contando com parâmetros de limite de detecção, distância projetiva e raio de alcance dos agentes. Também é configurado o comportamento errante (*wandering behaviour*) (Figura) relativo ao sistema. Este tipo de comportamento é definido pela aleatoriedade de direção na qual há um certo nível de ordem e controle. A condução da direção em um determinado momento está atrelada à condução da direção do momento seguinte, o que aumenta o nível de complexidade do movimento dos agentes (REYNOLDS, 2017). O agente (A_0) projeta uma localização temporária à frente ($A_{0\text{-}1}$), na direção do seu vetor de velocidade (V_0), determina um círculo de raio (R) no ponto temporário e, então, escolhe aleatoriamente um ponto ao longo da circunferência para a sua real localização (A_1). O movimento seguinte toma este ponto de localização (A_1) e replica o método, no qual a posição aleatória do ponto temporário ($A_{1\text{-}2}$) é sempre o alvo do vetor (V_2) do agente (A_2) a cada iteração (SHIFFMAN, 2017).

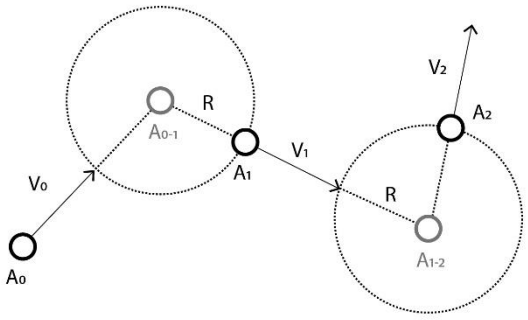


Figura 5 Diagrama de funcionamento do comportamento errante. Elaborado pelo autor com base na leitura de Shiffman (2017).

O último nível de configuração do *Agent-based System* diz respeito aos aspectos de representação do sistema simulado, sendo possível ter uma saída de dados de forma gráfica, com a possibilidade de gradientes de cores, ou geométrica, em uma sequência de pontos. Nesta etapa, também é possível configurar o tamanho do rastro dos agentes.

As configurações gerais, de movimentação, de comportamentos, dos aspectos visuais e geométricos e número de iterações são inseridos como dados de entrada do algoritmo que soluciona esse sistema. No caso deste experimento, foram configurados 20 agentes tridimensionais com velocidade de movimentação inicial de 0.002 m/s, velocidade máxima de 0.010 m/s, força máxima de 0.0008 m/s^2 e multiplicador de velocidade no valor de 5.6. O limite de detecção dos agentes, que permite o agente detectar outras formas, foi configurado como 1 m. A distância projetiva em relação às linhas-guia e o raio das mesmas foi considerado 0.1m e 0.001 m, respectivamente. O valor de controle da aleatoriedade do comportamento errante foi configurado como 0.5, o raio da localização temporária do agente foi considerado 1 m e o valor escalar do vetor foi considerado 0.1 m. O tamanho máximo do rastro dos vetores foi configurado como 5m. Estes dados foram computados em 265 iterações e resultaram na geometria da Figura 6.

A terceira etapa do experimento enfoca a análise estrutural das curvas resultantes da simulação dos agentes autônomos, compreendendo-as como a estrutura física do sistema que define a forma da coluna (Figura 7). Nesta etapa, as curvas são simplificadas em segmentos de retas e atribuídas de características que as possibilitem ser analisadas como um sistema de barras. Esta análise de desempenho estrutural foi

realizada por meio do *add-on* Karamba 3D de engenharia estrutural paramétrica, desenvolvido por Clemens Preisinger em cooperação com Bollinger-Grohmann-Schneider ZTGmbH Vienna. Cada ponto inicial dos 20 grupos de segmentos de retas recebeu tanto a força da gravidade quanto a força vertical de -5000 kN. Cada ponto final foi considerado um nó de suporte com todos os eixos de translação e rotação travados. As seções das barras foram consideradas circulares, com diâmetro de 0.259 m e espessura interna de 0.115 m. O concreto (C12/15) foi escolhido pela possibilidade de ser utilizado por meio da manufatura aditiva.



Figura 6 Etapa processual 2 – configuração e funcionamento do *Agent-based System*.

A análise das curvas como barras de um sistema estrutural resultou em um valor máximo de deslocamento de 0.404 m. Tendo em vista que o valor do deslocamento pode ser alterado em função de diversas variáveis do sistema, tornando o projeto estruturalmente inviável, é necessário que este valor seja o menor possível.



Figura 7 Etapa processual 3 – Análise estrutural das curvas formadas pelos rastros dos agentes autônomos interpretando-as como um sistema de barras.

A sistematização algorítmica por meio de regras, variáveis numéricas, procedimentos e restrições permitiu associar o processo de projeto a um algoritmo evolutivo com a finalidade de buscar soluções que atendessem satisfatória e simultaneamente ao critério definido (MARTINO, 2014). O algoritmo evolutivo tem origem na inteligência artificial e é capaz de reproduzir computacionalmente os mecanismos evolutivos que possibilitam a auto-organização e adaptação, como fundamentado na Teoria de Darwin (BITTENCOURT, 1996). Seguindo a estratégia da Natureza, este processo computacional promove a integração e interação de indivíduos de uma população para selecionar o mais apto segundo os critérios estabelecidos, ou seja, identificar os indivíduos que solucionem e satisfaçam os diversos objetivos que configuram um problema de projeto (FLOREANO; MATTIUSSI, 2008).

Desta forma, na quarta etapa do experimento, a análise estrutural do sistema de barras foi submetida a um processo de otimização por computação evolutiva que buscou minimizar do valor máximo de deslocamento do sistema. Utilizando o Galapagos, algoritmo evolutivo integrado ao Grasshopper, admitiu-se a minimização do deslocamento do sistema como a função *fitness* da otimização, bem como os seguintes parâmetros para o genoma: movimentação inicial, força máxima, multiplicador de velocidade e o valor de controle da aleatoriedade do comportamento errante dos agentes autônomos. O genoma também contempla os parâmetros relativos à espessura das seções das barras e ao comprimento máximo e mínimo das barras do sistema.

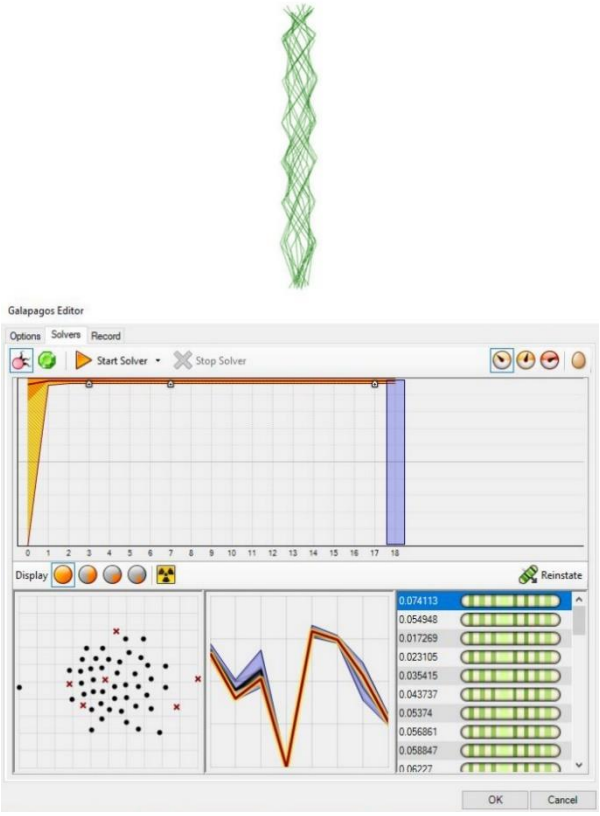


Figura 8 Etapa processual 4 – Minimização do valor de deslocamento das barras da coluna por meio de computação evolutiva. Interface do Galapagos, algoritmo evolutivo integrado ao Grasshopper.

A Figura 8 apresenta a interface gráfica do Galapagos, na qual é possível observar a relação dos indivíduos em função das gerações, além dos índices de otimização do *fitness*. Na última geração foram encontradas 43 soluções que apresentam valores minimizados para a função de avaliação, e, portanto, atendem o critério de diminuição do deslocamento do sistema estrutural. O primeiro indivíduo da lista de genes é considerado o mais bem adaptado à condição estabelecida e apresenta os seguintes características paramétricas: velocidade inicial aumentada para 0.066 m/s, força máxima mantida em 0.0008 m/s^2, multiplicador de velocidade diminuído para 3.1, valor de aleatoriedade diminuído para 0.1, diâmetro da seção aumentado para 0.269 m, espessura interna aumentada para 0.124 m e comprimento máximo e mínimo de barras de 0.7 m e 0.03m. A associação de tais parâmetros promoveu a diminuição do deslocamento estrutural para 0.005 m.

Admitindo que a produção desse tipo de sistema de coluna pode ser viabilizada por meio de métodos de manufatura aditiva, a última etapa deste experimento consiste no encapsulamento individual das curvas resultantes do processo de otimização. Foram encapsulados cem volumes definidos por malhas (*mesh*). Como apresentado na Figura 9, esses volumes foram unificados através de uma operação booleana e tiveram sua malha geométrica suavizada.



Figura 9 Etapa processual 5 – processo unificação volumétrica das barras resultantes da otimização estrutural.

Por fim, a Figura 10 apresenta o resultado deste experimento de coluna morfogenética.

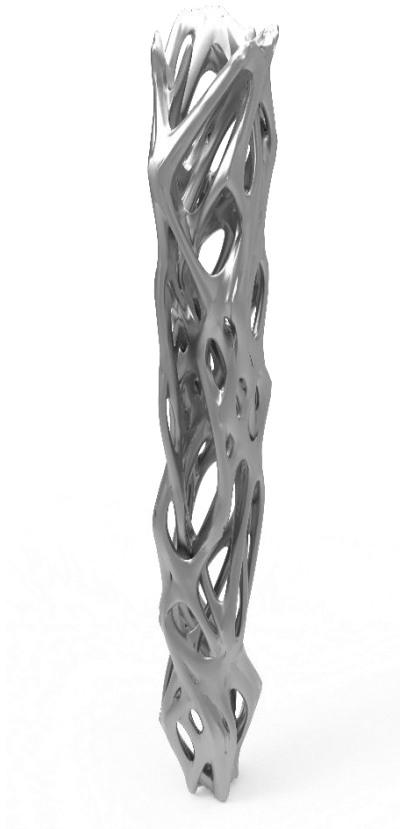


Figura 4 Resultado do experimento morfogenético.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há muito tempo, a Natureza é compreendida como o maior e melhor referencial para a produção humana. A reprodução e mimese visual dos sistemas biológicos é gradualmente superada pelo estudo do funcionamento de estratégias e lógicas presentes em sistemas naturais. O máximo desempenho a partir do uso mínimo de recursos materias é uma característica de muitos dos processos de materialização, estruturação e formação de organismos naturais que admitem a totalidade, a coerência, a correlação e a integração em seus processos. Tais qualidades podem ser incorporadas na Arquitetura, principalmente ao processos de projeto atentos às questões ambientais da construção, através de abordagens biomiméticas.

O experimento apresentado neste artigo é um exemplo de projeto biomimético computacional cuja intenção é incorporar as características de sustentabilidade da Natureza por meio da aplicação de conhecimentos sobre sistemas naturais em sistemas artificiais atentos à forma, ao processo e ao ecossistema. A metodologia morfogenética empregada neste experimento é uma abordagem biomimética específica que associa e integra metodologias de geração da forma (através de processos *bottom-up*), análise de desempenho estrutural e ambiental, otimização de resultados e questões de fabricação e construção.

O emprego do sistema baseado em agentes autônomos como método de geração da forma permitiu incorporar no processo de projeto os princípios naturais relativos ao crescimento e desenvolvimento da forma, como a diferenciação, a adaptação, a auto-organização e a emergência. Ao associar a geração da forma à análise de desempenho estrutural e ao desenvolvimento evolutivo, na busca por uma solução otimizada, o processo de projeto supera a simples mímese de uma forma natural e atinge o nível de analogia do processo identificado em sistemais naturais.

Em função de um determinado objetivo, os agentes naturais são capazes de se auto-organizarem, se adaptarem e se diferenciarem por meio de seus comportamentos individuais e grupais, dando emergência à forma material do sistema. De maneira análoga, o desenvolvimento do experimento descrito neste artigo demonstra a replicação dos princípios de crescimento e desenvolvimento evolutivo da forma natural em um processo artificial. A eficiência estrutural do sistema se deu por meio da otimização do resultado obtido a partir da associação de parâmetros de comportamento dos agentes a parâmetros de análise de desempenho estrutural. Em função das características morfológicas complexas, que tornam difícil a sua produção por métodos tradicionais de construção, considera-se que a maneira mais viável de materializar esta coluna morfogenética seja por meio do emprego métodos e ferramentas de manufatura aditiva à base de concreto.

Este experimento foi realizado por meio de metodologias computacionais raramente incorporadas no processo de projeto em arquitetura e design, caracterizados em geral pela maior importância da forma em relação às propriedades do material, estrutura e critérios de desempenhos. Constata-se, portanto, que o emprego de metodologias computacionais capazes de analisar e otimizar resultados a partir de diversos critérios de desempenho pode ser considerado uma abordagem muito eficiente para o projeto sustentável.

REFERÊNCIAS

1. AHLQUIST, S. et al. Development of a digital framework for the computation of complex material and morphological behavior of biological and technological systems. Computer-Aided Design, v. 60, n. C, p. 84–104, 2015.
2. AHMAR, S. A. S. E. Biomimicry as a Tool for Sustainable Architectural Design. Master of Science in Architecture—Alexandria, Egypt: University of Alexandria, 2011.
3. AHMED, M. M. G. Bio-digital Morphogenesis in Architecture: An Application on Digital-Botanic Architecture. Dissertação de Mestrado—Alexandria, Egypt: Universidade de Alexandria, 2015.
4. BAHAMÓN, A.; PÉREZ, P.; CAMPELLO, A. Inspired by Nature: Plants: The Building/Botany Connection. New York: W. W. Norton & Company, 2008.
5. BAHARLOU, E. Generative Agent-Based Architectural Design Computation: Behavioral strategies for integrating material, fabrication and construction characteristics in design processes. PhD Thesis—Stuttgart : Institute for Computational Design and Construction: University of Stuttgart, 2017.
6. BAHARLOU, E.; MENGES, A. Generative agent-based design computation: Integrating material formation and

construction constraints. Computation and Performance. Anais... In: PROCEEDINGS OF THE 31TH ECAADE CONFERENCE. Delft, Netherlands: Technical University of Delft, 2013

7. BAHARLOU, E.; MENGES, A. Toward a Behavioral Design System: An Agent-Based Approach for Polygonal Surfaces Structures. Computational Ecologies. Anais... In: PROCEEDINGS OF THE 35TH ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE. Cincinnati, Ohio: ACADIA, 2015
8. BENYUS, J. M. Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. New York: Harper Perennial, 1997.
9. BITTENCOURT, G. Inteligência Artificial: ferramentas e teorias. Campinas: Instituto de Computação - Unicamp, 1996.
10. BONABEAU, E. From Classical Models for Morphogenesis to Agent-based Models of Pattern Formation. Artificial Life, v. 3, n. 3, p. 191–211, 1997.
11. BONABEAU, E. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. . In: PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. 2002
12. CASTI, J. L. Would-be Worlds: How Simulation is Changing the Frontiers of Science. New York, Chichester and Weinheim: Wiley, 1997.
13. DICKINSON, S.; WATCHER, S. Nature as a Comprehensive Model: A Biomimetic Installation. Rethinking Comprehensive Design: Speculative Counterculture. Anais... In: 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA. Hong Kong: The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), 2014
14. DOUMPIOTI, C. Adaptive Growth of Fibre Composite Structures. Silicon + Skin: Biological Processes and Computation. Anais... In: PROCEEDINGS OF THE 28TH ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE. Minneapolis, Minnesota: ACADIA, 2008
15. ERIOLI, A.; ZOMPARELLI, A. Emergent Reefs. Synthetic Digital Ecologies. Anais... In: PROCEEDINGS OF THE 32ND ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE. San Francisco, California: ACADIA, 2012
16. FISCHER, T.; BURRY, M.; FRAZER, J. Triangulation of Generative Form for Parametric Design and Rapid Prototyping. Digital Design. Anais... In: PROCEEDINGS OF THE 21ST ECAADE CONFERENCE. Graz, Austria: eCAADe Conferences, 2003a
17. FISCHER, T.; BURRY, M.; FRAZER, J. How to Plant a Subway System. Digital Design, Research and Practice. Anais... In: PROCEEDINGS OF THE 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN FUTURES (CAADFUTURES). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003b
18. FLOREANO, D.; MATTIUSSI, C. Bio-inspired artificial intelligence: theories, methods and technologies. Cambridge: The MIT Press, 2008.
19. FOGED, I. W. et al. Acoustic Environments: Applying Evolutionary Algorithms for Sound Based Morphogenesis. Digital Physicality | Physical Digitality. Anais... In: PROCEEDINGS OF THE 30TH ECAADE CONFERENCE. Prague, Czech Republic: Czech Technical University, 2012
20. FU, K. et al. Bio-Inspired Design: An Overview Investigating Open Questions from the Broader Field of Design-by-Analogy. Journal of Mechanical Design, v. 136, n. 11, 2014.
21. GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.
22. GILBERT, N. Agent-Based Models. In: Encyclopedia of GIS. Los Angeles, California: Springer US, 2008. v. 7.
23. GOEL, A. K.; MCADAMS, D. A.; STONE, R. B. Biologically Inspired Design - Computational Methods and Tools. London Heidelberg New York Dordrecht: Springer, 2014.
24. HELMS, M.; VATTAM, S. S.; GOEL, A. K. Biologically Inspired Design: Process and Products. Design Studies, v. 30, n. 5, p. 606–622, 2009.
25. HENSEL, M. Towards Self-Organisational and Multiple-Performance Capacity in Architecture. In: Techniques and Technologies in Morphogenetic Design. [s.l.] Wiley, 2006. v. 76.
26. HENSEL, M.; MENGES, A.; WEINSTOCK, M. Emergence in Architecture. In: Emergence: Morphogenetic Design Strategies. [s.l.] Wiley, 2004. v. 74.
27. HOLLAND, J. H. Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity. Bulletin of Science, Technology & Society, v. 17, n. 4, p. 205–205, 1995.
28. HOLLAND, J. H.; MILLER, J. H. Artificial Adaptive Agents in Economic Theory. The American Economic Review, v. 81, n. 2, p. 365–370, 1991.
29. IÇMELI, B. Digital Morphogenesis in Architectural Design. ARCHDESIGN. Anais... In: INTERNATIONAL ARCHITECTURAL DESIGN CONFERENCE. Istambul: 2014
30. KLEIN, L. A Phenomenological Interpretation of Biomimicry and its Potential Value for Sustainable Design. Master of Science—Kansas: University of Kansas, 2009.
31. KNIPPERS, J.; SPECK, T.; NICKEL, K. G. Biomimetic Research: A Dialogue Between the Disciplines. In: Biomimetic Research for Architecture and Building Construction, Biologically-Inspired Systems 8. Cham, Switzerland: Springer, 2016. v. 9p. 1–5.
32. KOLAREVIC, B. (ED.). Architecture in the Digital Age - Design and Manufacturing. New York: Spon Press, 2003.
33. KOLAREVIC, B. Towards Integrative Design. International Journal of Architectural Computing, v. 7, n. 3, p. 335–344, 2008.
34. LEACH, N. Digital Morphogenesis. Architectural Design, v. 79, n. 1, p. 32–37, 2009.
35. MARTINO, J. A. DE. O algoritmo evolutivo como método no processo de definição de brises. Encontro da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Anais... In: ARQUITETURA, CIDADE E PROJETO: UMA CONSTRUÇÃO COLETIVA. São Paulo: 2014
36. MENGES, A. Computational Morphogenesis: Integral Form Generation and Materialization. Em'body'ing Virtual Architecture. Anais... In: THE 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ARAB SOCIETY FOR COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN (ASCAAD). Alexandria, Egypt: The Arab Society for Computer Aided Architectural Design, 2007
37. MENGES, A. Simple Systems - Complex Capacities. Integrative Processes of Computational Morphogenesis in Architecture. Journal of Technology for Architecture and Environment, v. 2, p. 68–77, 2011.
38. MENGES, A.; WEINSTOCK, M.; HENSEL, M. Emergent Technologies and Design: Towards a Biological Paradigm for Architecture. 270 Madison Avenue, New York: Routledge, 2010.
39. MITCHELL, W. J. A Lógica da Arquitetura: projeto, computação e cognição. Traducao Gabriela Celani. Campinas. SP: Editora da Unicamp, 2008.
40. MUELLER, G. B.; NEWMAN, S. A. Origination of Organismal Form. Cambridge: MIT Press, 2003.
41. MYERS, W. BioDesign: Nature, Science, Creativity. New York: Thames & Hudson, 2012.

42. NERLA, M. G.; ERIOLI, A.; GARAI, M. Modulated Corrugations by Differential Growth: Integrated FRP tectonics towards a new approach to sustainability, fusing architectural and energy design for a new students' space. ShoCK – Sharing of Computable Knowledge. Anais... In: PROCEEDINGS OF THE 35TH ECAADE CONFERENCE. Rome, Italy: eCAADe and Sapienza University of Rome, 2017
43. OXMAN, N. Material-based Design Computation. Tese de Doutorado—Massachussetts: Massachussetts Institute of Technology, 2010.
44. OXMAN, N. Material Ecology. In: OXMAN, R.; OXMAN, R. (Eds.). . Theories of the Digital in Architecture. London: Routledge, 2013.
45. OXMAN, N. et al. (EDS.). Material Ecology. Computer-Aided Design, v. 60, p. 1–2, 2015.
46. OXMAN, R. Digital Tectonics as a Morphogenetic Process. Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures. Anais... In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES (IASS). Valencia: Universidad Politecnica de Valencia, Spain, 2009
47. OXMAN, R.; OXMAN, R. The New Structuralism: Design Engineering and Architectural Technologies. Architectural Design, v. 80, n. 4, p. 14–23, 2010.
48. PEDERSEN ZARI, M. Biomimetic Approaches to Architectural Design for Increased Sustainability. Transforming out Built Environment. Anais... In: THE SB07 NZ SUSTAINABLE BUILDING CONFERENCE. New Zealand: 2007
49. RAMIREZ-FIGUEROA, C.; DADE-ROBERTSON, M.; HERNAN, L. Adaptive Morphologies: Toward a Morphogenesis of Material Construction. Adaptive Architecture. Anais... In: PROCEEDINGS OF THE 33RD ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE. Cambridge, England: ACADIA, 2013
50. REYNOLDS, C. Culebra V 2.0: User's Guide to CulebraComplicitmatter, 2017. Disponível em: <http://www.complicitmatter.com/culebra-net/>
51. RIAN, I. M.; SASSONE, M. Tree-inspired Dendriforms and Fractal-like Branching Structures in Architecture: A Brief Historical Overview. Frontiers of Architectural Research, v. 3, n. 3, p. 298–323, 2014.
52. ROUDAVSKI, S. Towards Morphogenesis in Architecture. International Journal of Architectural Computing, v. 07, n. 03, p. 345–374, 2009.
53. SEIREG, A. Leonardo da Vinci - The Bio-Mechanician. In: BOOTZIN, D.; MUFFLEY, H. C. (Eds.). . Biomechanics. New York: Plenum, 1969.
54. SHIFFMAN, D. Culebra V 2.0: User's Guide to CulebraComplicitmatter, 2017. Disponível em: <http://www.complicitmatter.com/culebra-net/>
55. STEADMAN, P. The Evolution of Designs: Biological Analogy in Architecture and the Applied Arts. Revised Edition ed. 711 Third Avenue, New York, NY 10017: Routledge, 2008.
56. THOM, R. Form and Structural Stability. In: Structural Stability and Morphogenesis. An Outline of a General Theory of Models. 1st. ed. Reading: W. A. Benjamin, 1975.
57. THOMPSON, D. W. On Growth and Form. Cambridge: University Press, 1942.
58. TURING, A. The Chemical Basis of Morphogenesis. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B. v. 237, n. 641, p. 37, 1952.
59. WEGST, U. G. K. et al. Bioinspired Structural Materials. Nature Materials, n. 14, p. 23–36, 2014.
60. WEINSTOCK, M. Evolution and Computation. In: Emergent Technologies and Design: Towards a Biological Paradigm for Architecture. 270 Madison Avenue, New York: Routledge, 2010. p. 23–41.
61. YELER, G. M. Influences of the Living World on Architectural Structures: An Analytical Insight. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, v. 20, n. 1, p. 23–38, 2015.