

Revisão Sistemática de Morfologias Inspiradas na Natureza – Piic/Ufes

Edital:	Edital Piic 2023/2024
Área do Conhecimento (CNPq):	Ciências Sociais Aplicadas
Subárea do Conhecimento (CNPq):	Arquitetura e Urbanismo
Título do Projeto:	Ecologias de Projeto
Título do Subprojeto:	Revisão Sistemática das Morfologias Inspiradas na Natureza
Professor Orientador:	Prof. Dr. Bruno Massara Rocha / Doutoranda Elisa Bomtempo Matos
Estudante:	Luísa Gonzaga Barcelos

Resumo

Essa pesquisa teve como principal objetivo explorar morfologias complexas inspiradas na natureza, nos campos da biomimética, do design biofilico e dos sólidos celulares. Esses conceitos são amplamente aplicados em diversos campos de estudo visando melhorar a eficiência estrutural, energética, conforto ambiental e sustentabilidade, e esse estudo busca identificar como eles têm sido utilizados no campo da arquitetura. A partir disso pôde-se identificar quais são as vantagens e dificuldades do uso de morfologias complexas na concepção da forma e no desempenho dos edifícios, por meio da análise estudos de caso examinando métodos, materiais e técnicas aplicadas. Essa abordagem destaca a importância de soluções arquitetônicas sustentáveis e eficientes, com o intuito de reduzir o impacto ambiental da construção civil, causado pelo uso excessivo de materiais, consumo elevado de energia e o desperdício de recursos. Essa pesquisa busca demonstrar como esses princípios podem transformar o futuro da arquitetura exemplificando com projetos de sucesso e incentivar pesquisas adicionais no assunto.

Palavras-chave: “Estruturas Aeradas.”. “Biomimética.”. “Design Biofilico.”. “Sólidos Celulares.”.

1 Introdução

O Grupo de Pesquisa Conexão VIX tem como objetivo criar um núcleo avançado de pesquisa, projeto e fabricação digital, com foco no apoio a projetos de inovação tecnológica em áreas como interatividade, computação paramétrica e sistemas ecológicos. O grupo se dedica ao desenvolvimento de soluções arquitetônicas adaptativas, responsivas e colaborativas, abrangendo tanto a exploração física de estruturas construídas quanto a criação e configuração de sistemas digitais programáveis. Em uma de suas linhas de pesquisa, denominada Ecologias de Projeto, na qual essa pesquisa se insere, a produção do grupo está orientada para a análise e discussão de alternativas de uso e aplicação de recursos digitais na concepção de projetos, de modo a melhorar a experiência da cidade e sua relação com os moradores integrando aspectos naturais, sociais e econômicos. Nesse contexto, a inspiração na natureza tem se mostrado uma fonte valiosa de ideias e soluções criativas. Ao observar e compreender essas soluções naturais, os arquitetos têm encontrado inspiração para criar morfologias complexas que podem ser aplicadas na concepção de estruturas (DURO-ROYO et al., 2015). Dessa

forma, essa pesquisa tem como objetivo explorar as áreas de estruturas inspiradas na natureza, em temáticas como: a biomimética, design biofilico e os sólidos celulares no campo da arquitetura.

2 Objetivos

Essa pesquisa tem como principal objetivo o estudo da arquitetura no campo de morfologias complexas inspiradas na natureza, investigando as estratégias empregadas e os principais métodos utilizados. Mais especificamente a pesquisa explora a relação da aplicação dos conhecimentos de biomimética, design biofilico e sólidos celulares na arquitetura com o aprimoramento do desempenho de tais morfologias, considerando como critérios eficiência estrutural, eficiência energética, conforto ambiental, biodiversidade, durabilidade e adaptabilidade. Para uma análise completa foram identificados os métodos aplicados em cada projeto, bem como seus materiais, técnicas construtivas e os processos de fabricação envolvidos.

3 Embasamento Teórico

O termo biomimética foi cunhado por Otto Schmitt em 1982, porém é mais conhecido pela pesquisa de Janine Benyus, que em 1997 publicou o livro “Biomimética: Inovação Inspirada pela Natureza”. No livro a autora descreve a biomimética como uma abordagem para resolver desafios humanos por meio da imitação e adaptação de soluções encontradas na natureza. Para Benyus a biomimética pode ser estudada em três campos, que analisam diferentes aspectos das soluções naturais, são eles: a natureza como modelo, como medida e como mentora (BENYUS, 1997). Embora sua origem etimológica venha da junção das palavras “vida” e “mimesis”, a biomimética não é uma imitação das formas encontradas na natureza, sua essência está baseada na função. Elegantes formas e eficientes funcionalidades costumam ser encontradas juntas na natureza, porém é um equívoco achar que ao replicar uma das duas a outra irá acompanhar automaticamente. A função de um sistema pode não ser inerente à sua forma (TURNER, 2012). Por isso o estudo da biomimética se dedica a entender de maneira aprofundada como funcionam os complexos sistemas naturais, sejam eles ninhos de cupim, colmeia de abelhas ou ainda elementos pontuais, como ossos de passarinhos, esponjas do mar e camarão mantis. (ZHANG et al., 2023)

Ao entender a arquitetura dos materiais e sistemas naturais é possível aplicá-los em materiais construtivos e edificações para solucionar problemas, melhorar a eficiência ao utilizar menos recursos ou energia, ou proporcionar maior conforto aos usuários (SCHAEDLER; CARTER, 2016). Além disso, a implementação de sistemas inspirados na natureza também visa reduzir o impacto ambiental causado pelo setor da construção civil, devido ao uso excessivo de materiais, desperdício de água e alto consumo de energia. De acordo com Stark et al. (2017), a construção civil é responsável por mais de 80% das emissões de CO₂ e 26% do consumo de energia na União Europeia, além de grandes emissões de gases com efeito estufa, por conta do combustível fóssil utilizado na maioria dos maquinários. (STARK et al. 2017). Assim a natureza inspira e auxilia a arquitetura a desenvolver suas construções cada dia mais sustentáveis com menor impacto ambiental. A biomimética, ao explorar soluções inspiradas na natureza, abre caminho para o desenvolvimento de materiais e estruturas que imitam as funcionalidades dos sistemas naturais. Nesse contexto, o estudo dos *sólidos celulares* ganha destaque, pois

muitos dos exemplos encontrados na natureza, como ossos e esponjas, seguem esse princípio de organização celular. Essas estruturas oferecem uma combinação de leveza e resistência, características essenciais para diversas aplicações, incluindo a arquitetura, onde a eficiência e a sustentabilidade são cada vez mais exigidas. *Sólidos celulares* são materiais porosos compostos por uma rede de células que se interconectam, essas redes podem ser abertas ou fechadas. Nos sólidos abertos as células estão ligadas, formando uma rede contínua, que permite a passagem de fluidos. Já nos sólidos fechados as células são isoladas, sem conexão uma com a outra, isso lhe dá propriedades de isolamento térmico e acústico assim como uma maior rigidez. (GIBSON, 2003). Os sólidos celulares vêm sendo estudados desde o século XVII, o interesse por esses elementos surge e se mantém por causa de suas imensas aplicabilidades (GIBSON, 2003). Suas estruturas celulares fazem com que eles sejam materiais leves, de alta resistência e eficiência, sendo sua principal propriedade a sua baixa densidade. Na natureza podem ser encontrados exemplos de sólidos celulares, como a madeira, cortiça, esponjas e em ossos do tipo trabécula (GIBSON; ASHBY, 1997).

O estudo de sólidos celulares costuma estar atrelado ao de modelagem e manufatura aditiva, em que pesquisas e experimentos são feitos para desenvolver células e aprimorar seu desempenho estrutural e mecânico. Obtido a partir da análise de diferentes padrões de preenchimento, que economizam material e aceleram o tempo de produção de cada peça mantendo o desempenho desejado, alcançando o padrão celular mais eficiente (FORÉS-GARRIGA; GÓMEZ-GRAS; PÉREZ, 2023). Os conhecimentos de sólidos celulares podem ser utilizados em diversas áreas e setores, como na arquitetura, engenharia aeroespacial, automotiva e biomédica. Na arquitetura ele pode ser aplicado no desenvolvimento de materiais estruturais leves e de alta resiliência para várias aplicações, como estruturas carregadas de impacto ou colisão (JIANG et al., 2020). Enquanto os sólidos celulares fornecem soluções estruturais e funcionais para otimizar o uso de materiais e recursos, o conceito de biofilia complementa essa abordagem ao focar no impacto da natureza sobre o bem-estar humano. Se os sólidos celulares nos aproximam da eficiência observada em sistemas naturais, o design biofílico aprofunda essa conexão ao trazer elementos naturais e ecológicos para dentro dos ambientes construídos, promovendo uma integração que vai além da técnica, para alcançar também o equilíbrio emocional e psicológico dos ocupantes.

A natureza pode se mostrar um empecilho à implantação de uma arquitetura, a ser vencida conforme a criatividade do próprio arquiteto. Como na casa da cascata de Frank Lloyd Wright, onde elementos anteriores à intervenção foram incorporados aos mesmos de maneira harmoniosa e engenhosa (ZHONG; SCHRÖDER; BEKKERING, 2022). Atualmente a natureza é vista como elemento necessário à vivência humana, e consequentemente necessário na arquitetura. O termo biofilia foi inicialmente cunhado pelo Dr. Erich Fromm, e é explicado pelo biólogo Edward O. Wilson como a afinidade inata dos seres humanos pela natureza, ele enfatiza a importância de que essa relação seja nutrida e encorajada (EMAMJOMEH; ZHU; BECK, 2020). Foi estudado que os espaços biofílicos presentes na arquitetura não têm apenas função estética, mas afetam diretamente o bem-estar biológico dos seus ocupantes. Dentre os efeitos positivos causados pela presença de elementos naturais em ambientes arquitetônicos estão a redução de estresse e da ansiedade, aumento do desempenho mental, da produtividade e da criatividade, melhorias no humor e ajuste do relógio circadiano (ABAZARI; POTVIN; DEMERS; GOSSELIN, 2022). A presença de uma janela próxima ao ambiente de

trabalho com vista pode influenciar a percepção térmica, bem como nas respostas emocionais dos seres humanos, e seu desempenho em ambientes internos, ressaltando a importância da natureza na vida cotidiana humana, ainda que seja por meio de uma conexão visual (KO et al., 2020).

Dessa maneira o design biofílico se faz cada vez mais necessário, indo além de uma simples aplicação de vegetação em edifícios. Ele incorpora de maneira intencional ambientes de transição, vistas para o exterior, materiais naturais e vegetações nas edificações com o objetivo de promover o bem-estar de seus ocupantes (ZHONG; SCHRÖDER; BEKKERING, 2022). A biomimética, sólidos celulares e design biofílico tendem a estar cada vez mais presentes na arquitetura, visando um futuro mais sustentável e saudável, sendo assim faz-se necessário o estudo dessas áreas e o conhecimento de suas aplicações e limitações.

4 Metodologia

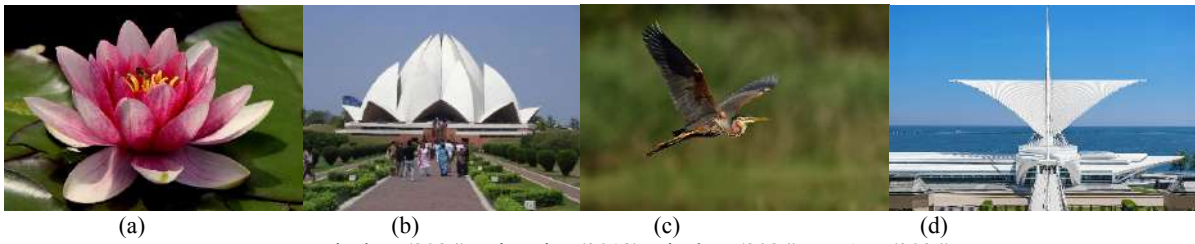
A metodologia dessa pesquisa compreende uma primeira etapa de revisão sistemática da literatura existente sobre os temas biomimética, sólidos celulares e design biofílico aplicados à arquitetura. A primeira etapa da pesquisa foi conduzida nas bases de dados científicos *Science Direct* e Periódicos CAPES, em assuntos relacionados a biomimética, sólidos celulares e design biofílico na arquitetura. Foram adotados diversos critérios de inclusão e exclusão dos artigos, resultando em um número final de 41 artigos a serem lidos. Análoga a leitura dos artigos, foram produzidos fichamentos para melhor organização das informações adquiridas.

Após a leitura deu-se início a segunda etapa da pesquisa com a captação de estudos de caso de projetos arquitetônicos construídos que utilizaram da biomimética para aprimorar o desempenho da edificação, a fim de responder perguntas relacionadas a limitações construtivas dessas abordagens. A busca foi realizada a princípio no escopo dos artigos selecionados, porém houve necessidade de expandir o campo de busca para atingir um número adequado de estudos de caso para o banco de dados. A terceira e última etapa da pesquisa foi a análise dos dados coletados e avaliação das morfologias complexas inspiradas na natureza. Os critérios avaliados foram eficiência estrutural e energética sustentabilidade, conforto ambiental e funcionalidade.

5 Resultados e Discussão

Os estudos de caso analisados abrangeram projetos em que a inspiração biomimética estivesse explicitada pelo arquiteto ou escritório responsável, e tivesse relação direta com a funcionalidade, seja eficiência estrutural, conforto térmico ou economia de material. Edificações onde a morfologia inspirada na natureza tinha propósito principalmente estético ou sem explicação suficiente acerca da inspiração não estraram no escopo de análise dessa pesquisa. Como o Templo de Lótus, de Fariborz Sahba, que possui o formato das pétalas da flor; ou o Museu de Arte de Milwaukee de Santiago Calatrava, que tem sua arquitetura inspirada em asas de pássaros que se abrem e fecham ao longo do dia.

Figura 1: (a) Fotografia da flor de Lótus, (b) fotografia do Templo de Lótus, (c) fotografia de uma asa de pássaro e (d) fotografia do Museu de Arte de Milwaukee.



Fonte: Pixabay (2024), Vitruvius (2013), Pixabay (2024) e MAM (2024).

Os projetos selecionados foram estudados e analisados em três grandes temas: eficiência estrutural, conforto ambiental e eficiência energética. Porém foi observado que dificilmente as três áreas são contempladas em um mesmo projeto, as morfologias inspiradas em sua maioria possuem uma das áreas como objetivo principal de aprimoramento em relação a concepção da forma e métodos de construção convencionais.

O edifício *Eastgate Building*, projetado pelo *Pearce Partnership* em Harare, Zimbábue, foi inspirado em ninhos de cupins, e utiliza ventilação natural para regular a temperatura interna. Esse sistema permite que o ar quente seja expelido pela parte superior, enquanto o ar frio entra pelas aberturas inferiores, eliminando a necessidade de ar-condicionado.

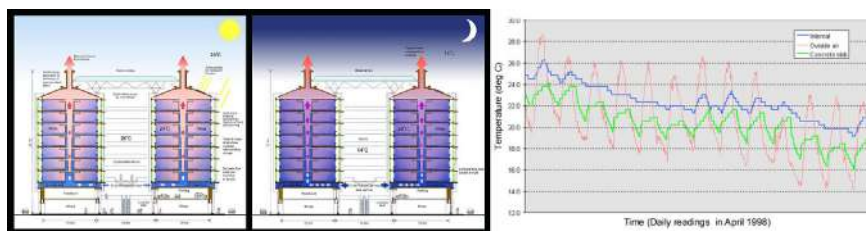
Figura 2: (a) Fotografia do Eastgate Building e (b) imagem representativa do fluxo de ar dentro do cupinzeiro e dentro das salas do Eastgate Building.



Fonte: Livin Spaces, 2018; Mick Pearce, 2016

A inércia térmica da estrutura, feita de tijolos de argila, garante um ambiente interno confortável ao longo do ano, mesmo em um clima quente. O prédio é notável por sua eficiência energética. Seu sistema de ventilação natural reduz o consumo de energia em até 35% em comparação com construções convencionais (PEARCE, 2016). Isso demonstra como a arquitetura pode integrar soluções baseadas na natureza para otimizar o conforto e a sustentabilidade, sem depender de tecnologias complexas e de alto custo.

Figura 3: (a) Imagem representativa do fluxo de calor dentro do edifício e (c) gráfico comparativo das variações térmicas internas e externas.



(a)

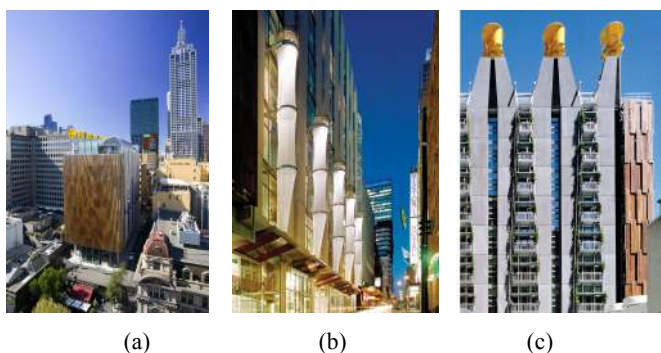
(b)

Fonte: Mick Pearce, 2016

A construção, além de eficiente, é um exemplo de como técnicas tradicionais podem ser reinterpretadas de forma inovadora. O *Eastgate Building* também destaca como os princípios da biomimética podem ser aplicados em larga escala. O projeto mostra que imitar a natureza não apenas resolve problemas de design, mas também cria espaços que se adaptam aos desafios ambientais. Essa abordagem é essencial para o futuro da arquitetura, especialmente em regiões com recursos limitados, onde soluções sustentáveis são cruciais.

O prédio *Council House 2*, em Melbourne, Austrália, projetado por *DesignInc*, assim como o *Eastgate Building* é inspirado no sistema de ventilação de cupinzeiros. O edifício promove a circulação constante do ar, renovando-o a cada 30 minutos, por meio de um sistema de convecção. Esse sistema auxilia na manutenção da temperatura, garantindo conforto térmico, e melhora significativamente a qualidade do ar para seus ocupantes com a constante oxigenação dos ambientes. Além disso, brises solares foram posicionados na fachada refletindo a luz solar para as salas, reduzindo a necessidade de iluminação artificial. Outro elemento implementado para auxiliar no conforto visual foi uma parede verde nas varandas que serve para filtrar a luz solar, fazendo com que ele entre de maneira difusa nos ambientes internos (PEARCE, 2016).

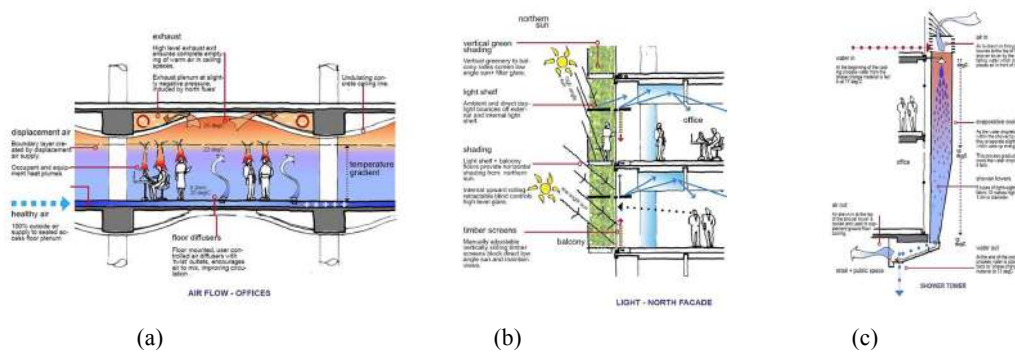
Figura 4: Fotografias do (a) Council House 2, (b) sistema de resfriamento de ar com água e (c) chaminé ventilada.



Fonte: Mick Pearce (2016)

O edifício se destaca por sua abordagem inovadora ao consumo de energia. O uso de painéis solares e um sistema de captação de água da chuva, aliados a uma fachada verde, reduzem o impacto ambiental. O *Council House 2* não só minimiza a pegada de carbono, mas também integra o bem-estar dos ocupantes com o design sustentável, tornando-se um modelo para construções urbanas.

Figura 5: Imagens ilustrativas (a) do fluxo de ar interno, (b) dos brises e incidência solar na fachada e (c) sistema de resfriamento do ar com água.



Fonte: Mick Pearce (2016)

A aplicação de técnicas de inspiração biomiméticas no projeto é um exemplo de como a arquitetura pode ser tanto eficiente quanto agradável. O design não é apenas funcional, mas também esteticamente sofisticado, criando um equilíbrio entre forma e função. A integração harmoniosa de elementos naturais reflete um compromisso com a sustentabilidade e a inovação.

A edificação *Gherkin*, em Londres, projetado por Norman Foster, também incorpora biomimética em seu design. Inspirado na estrutura da esponja marinha "cesta de flor de Vênus", sua forma treliçada proporciona rigidez contra a corrente marítima e direciona o fluxo de água interno para cima, saindo pelos flagelos superiores. De maneira similar as esponjas o edifício foi planejado para ter uma ventilação natural eficiente. Sua forma aerodinâmica permite a circulação de ar interno de maneira otimizada, com o ar quente sendo expelido pela parte superior e o ar fresco entrando pelas aberturas inferiores (Foster and Partners, 2024).

Figura 6: Fotografias (a) da cesta de flor de Vênus e (b) do *Gherkin*

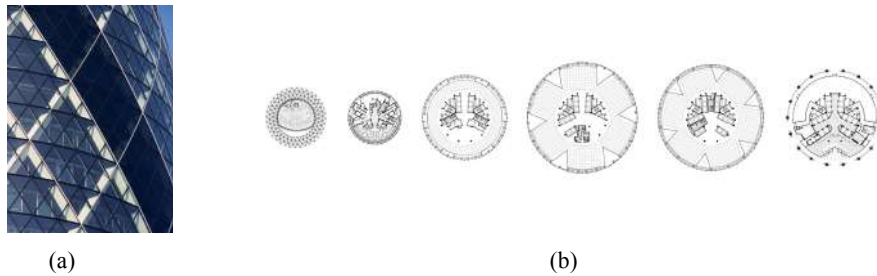


Fonte: NatSCA (2016) e ArchiDaily (2019)

A fachada treliçada em vidro duplo maximiza a entrada de luz natural, reduzindo a necessidade de iluminação artificial, e age também como uma camada isolante fazendo com que o edifício de vidro não vire uma estufa (ArchiDaily, 2019). No entanto, apesar da inovação no design, o desempenho sustentável do Gherkin não atendeu completamente às expectativas. As janelas são mantidas fechadas por questões práticas, o que levou à dependência de sistemas de ar-condicionado, contrariando a proposta inicial de ventilação natural. Isso ilustra os desafios de implementar soluções biomiméticas em ambientes urbanos complexos, onde variáveis externas podem influenciar os resultados. Mesmo assim, o Gherkin se consolidou como um ícone arquitetônico de Londres, não apenas por sua estética futurista, mas também por introduzir novos paradigmas de sustentabilidade

em grandes construções. Seu design, inspirado pela natureza, continua a influenciar projetos arquitetônicos ao redor do mundo.

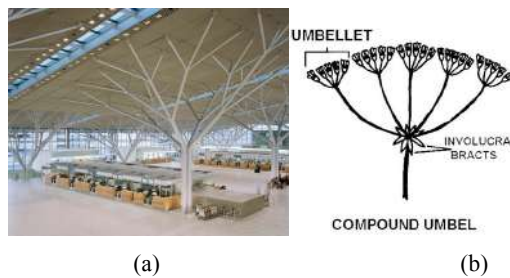
Figura 6: (a) Fotografia da fachada dupla e janelas do Gherkin e (b) plantas baixas que mostram as aberturas na laje para circulação de ar.



Fonte: ArchiDaily (2019)

O Aeroporto de Stuttgart, projetado por *Gerkan, Marg and Partner*, é um exemplo de como a biomimética pode ser aplicada em soluções estruturais. Inspirado em plantas umbelas, onde a carga é distribuída aos membros a partir de um único ponto de apoio, essa conexão é feita de maneira articulada, proporcionando estabilidade. No aeroporto isso é incorporado na estrutura dos pilares metálicos, que permitem a distribuição eficiente das cargas, com ramificações que se assemelham a galhos de árvores, e concentram sua carga em uma base robusta, através de uma conexão articulada que impede o movimento entre esses dois componentes e reforça a estabilidade da estrutura (AHMETI, 2007).

Figura 8: (a) Fotografia da estrutura do pilar no aeroporto e (b) imagem ilustrativa de uma planta tipo umbela

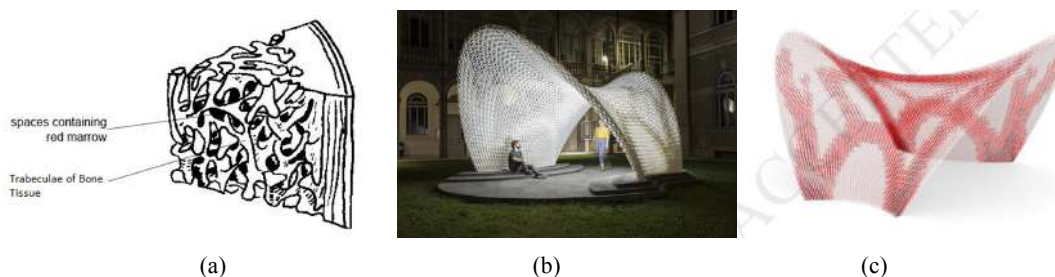


Fonte: SBP (2024) e Rikysongsu (2017)

Esse design permite criar grandes vãos livres, economizando material sem comprometer a estabilidade e segurança da estrutura. Além de sua eficiência estrutural, a arquitetura do aeroporto é visualmente impactante. Os pilares metálicos, com suas ramificações, criam uma sensação de leveza e fluidez, apesar da robustez do material. O uso eficiente dos recursos e a economia de material são pontos fortes do projeto, reforçando a importância da inspiração na natureza para soluções arquitetônicas. A abordagem biomimética do Aeroporto de Stuttgart demonstra como a observação da natureza pode inspirar ideias alternativas para o projeto que aliam funcionalidade e estética, garantindo a economia de material e conferindo ao projeto um caráter compositivo e complexo.

O Pavilhão Trabécula, projetado por Roberto Naboni em 2018, em Milão, é um projeto que explora a microestrutura dos ossos humanos. Inspirado na morfologia óssea do tipo trabecular, onde sua porosidade varia para suportar diferentes tensões de compressão e tração, de modo a maximizar a eficiência do material. Isso foi aplicado ao projeto do pavilhão por meio do desenvolvimento de algoritmos para a criação de uma estrutura celular responsiva, que de maneira similar responde a variações de carga. Os pontos da estrutura que estão submetidos a tensões elevadas possuem reforço estrutural, enquanto as áreas de menor tensão são afinadas, criando uma estrutura leve, mas altamente resistente (DOUNIA MOUJAHID, 2023).

Figura 9: (a) Imagem representativa da estrutura interna do osso, (b) fotografia do pavilhão e (c) representação da distribuição de carga na estrutura do pavilhão

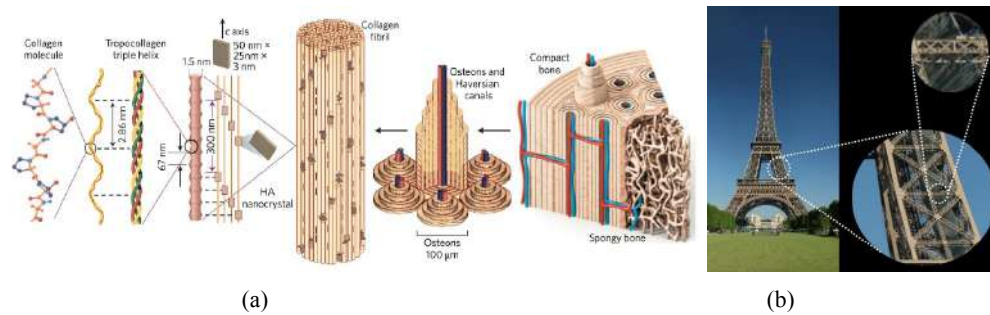


Fonte: IAAC (2023), ACTLAB (2018) e NABONI (2019)

A biomimética, nesse caso, é aplicada de forma minuciosa para replicar a eficiência estrutural dos ossos. O sistema de célula responsiva à tensão utilizado no design do pavilhão causa uma redução no índice de peso por área, resultando em uma estrutura final até 10 vezes mais leve, porém sem perdas em sua performance mecânica (NABONI; BRESEGHELLO; KUNIC, 2019). Isso faz com que a estrutura final seja altamente eficiente e não tenha desperdício de material, pois o estudo estrutural é feito previamente, logo a obra se torna sustentável e inovadora. Essa abordagem é especialmente importante em um contexto em que o uso eficiente de recursos é cada vez mais necessário. O Pavilhão Trabécula mostra como a arquitetura pode se inspirar na biologia para criar soluções sustentáveis e de alta performance. O uso de tecnologias avançadas para replicar princípios naturais oferece um vislumbre do futuro da arquitetura, onde a eficiência estrutural será combinada com a sustentabilidade.

A Torre Eiffel, projetada por Gustave Eiffel, é um exemplo icônico da aplicação de biomimética na engenharia. Inspirada também na estrutura interna dos ossos, do fêmur e em sua capacidade estrutural. O fêmur possui uma hierarquização estrutural que garante estabilidade com baixa densidade, isso é feito a partir da junção de materiais semelhantes, porém com diâmetros consecutivamente menores. Elementos tubulares chamados de osteons são compostos por feixes menores, chamados fibrinas, que por sua vez são feitos de três fios entrelaçados, conferindo ao fêmur sua hierarquia estrutural que serviu de inspiração (BHATIA, 2015).

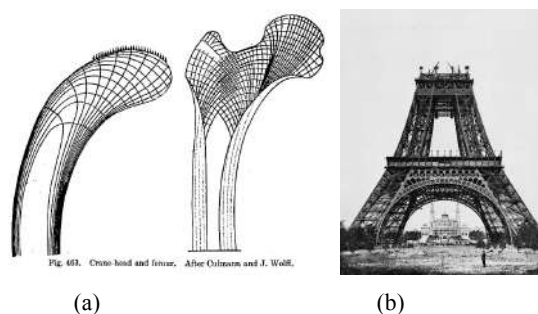
Figura 10: (a) Representação da estrutura interna do fêmur e (b) Fotografia da hierarquia das treliças na Torre Eiffel



Fonte: Wired, 2015

A morfologia da Torre Eiffel foi feita de maneira similar, hierarquizando o uso das treliças em diferentes escalas, isso certifica a integridade estrutural da torre ao mesmo tempo que permite que seu peso seja consideravelmente baixo. Um estudo da Wired afirma que todo o material em aço da torre Eiffel se derretido formaria uma esfera de apenas 12 metros de diâmetro, um valor pequeno quando comparada a sua altura de 324 metros. Outro ponto de inspiração do fêmur são suas curvas, sua morfologia é precisamente organizada de forma a minimizar o uso de material. Sua eficiência ocorre em função da capacidade do osso de identificar os pontos que estão sob maior demanda de carga, endurecendo essas áreas, enquanto os pontos onde há ausência de carga são atrofiados, dando origem ao seu formato irregular. Análogo a isso foi feito na Torre Eiffel, concentrado de maneira eficaz o uso adensado das treliças de aço nas áreas críticas de carga, principalmente em sua base, e reduzindo o uso em áreas de menor demanda de carga.

Figura 11: (a) Imagem representativa das curvas e linhas de força do fêmur e (b) Fotografia da Torre Eiffel



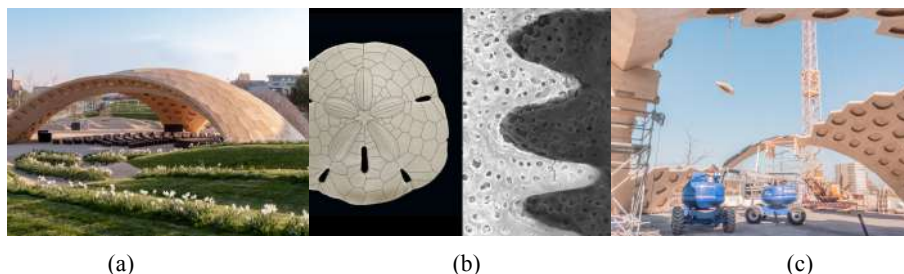
Fonte: Wired, 2015; ArchiDaily, 2016

Além de ser um marco turístico e cultural, a Torre Eiffel é uma prova de como a engenharia pode se beneficiar da natureza. Seu design minimiza o uso de recursos e maximiza a estabilidade, oferecendo uma solução eficiente e elegante para a construção de estruturas altas. A torre é um exemplo de como os princípios da biomimética podem ser aplicados para resolver problemas complexos de engenharia de forma inovadora.

O BUGA Wood Pavilion, desenvolvido pela Universidade de Stuttgart, é inspirado nos princípios morfológicos do esqueleto lamelar dos ouriços do mar. Sua estrutura possui variações na geometria que otimizam o uso de material e energia do ouriço, ele é composto por placas com conexões interligadas entre si individualmente. O pavilhão é composto por placas de madeira interligadas, formando uma estrutura leve e eficiente. O design

modular permite que o pavilhão seja montado e desmontado facilmente, tornando-o ideal para construções temporárias e sustentáveis.

Figura 12: (a) Fotografia do pavilhão Buga Wood, (b) representação



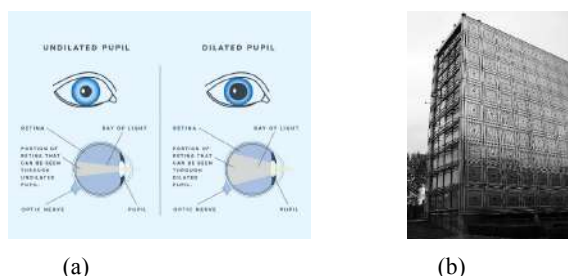
Fonte: ICD (2016)

A inspiração na natureza vai além da estética, influenciando diretamente o desempenho estrutural do pavilhão. O design garante que vãos livres de até 30 metros com apenas 3 apoios, em uma área de 500 metros quadrados, sejam cobertos sem a necessidade de suportes adicionais, economizando material e resultando em uma alta eficiência estrutural (ICD, 2016). O uso da madeira como material principal também contribui para a sustentabilidade do projeto, destacando a viabilidade de soluções ecologicamente responsáveis.

Este é um exemplo de como a biomimética pode inspirar não apenas projetos esteticamente agradáveis, mas também altamente funcionais e sustentáveis. Seu design modular e leveza estrutural o tornam um modelo para futuras construções temporárias.

O Instituto do Mundo Árabe, projetado por Jean Nouvel, utiliza uma fachada dinâmica que se adapta à luz solar, inspirada no funcionamento da pupila humana. O olho possui um sistema natural de controle de passagem de luz, ele permite a passagem de apenas o suficiente para que a imagem seja formada, logo em ambientes escuros a pupila se dilata e em ambientes claros a pupila se contrai.

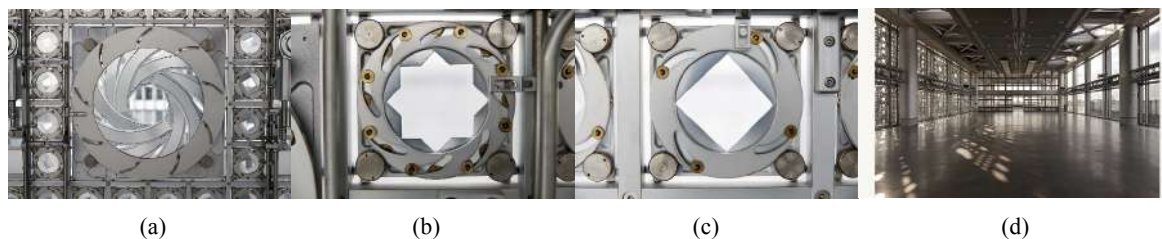
Figura 13: (a) Imagem representativa da captação de luz da pupila e (b) fotografia do Instituto do Mundo Árabe



Fonte: Warby Parker, 2024; ArchyDaily, 2011

O revestimento de fachada no Instituto do Mundo Árabe funciona de maneira similar, ela é composta por cerca de 240 muxarabis feitos de alumínio e controlados por células fotoelétricas, elas são programadas para abrir ou fechar de acordo com as condições lumínicas do momento. Dessa maneira a incidência solar nos ambientes internos é controlada (INSTITUT DU MONDE ARABE, 2016).

Figura 14: (a) - (d) Fotografias dos diferentes tipos de muxarabis e (f) fotografia da incidência solar interna



Fonte: IMA (2016)

A inspiração do instituto do Mundo Árabe vem de um sistema natural tão comum que pode até ter sua engenhosidade esquecida, o olho. A fachada dinâmica utilizada não apenas funciona como meio de redução de gastos energéticos e incidência de iluminação natural, mas também confere identidade e caráter ao edifício por meio de seu visual único. O uso da biomimética foi muito bem implementado nesse projeto, unindo a funcionalidade com a inovação estética.

O Estádio Nacional de Beijing, conhecido como "Ninho de Pássaro", projetado pelo escritório Arup, é um ícone arquitetônico inspirado na forma dos ninhos de pássaros, constituídos por emaranhados de galhos, folhas e gravetos que são entrelaçados de maneira a deixar a estrutura do ninho sólida e segura.

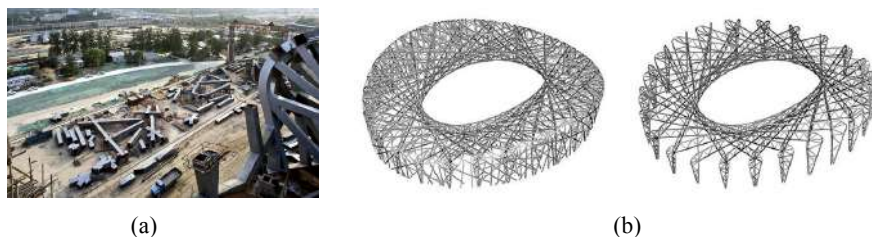
Figura 15: Fotografia (a) de um ninho de pássaro e (b) do Estádio Nacional de Beijing



Fonte: Pixabay (2024) e Arquitectura Viva (2024)

A estrutura de aço das vigas e colunas que se localizam ao redor do estádio foram posicionadas de modo que pode parecer aleatório, mas fazem com que o edifício tenha um alto desempenho estrutural, e contribui para sua resistência aos abalos sísmicos, fator crucial devido a localização do projeto. O design não apenas proporciona estabilidade, mas também contribui para a estética singular do estádio, que se tornou um marco durante os Jogos Olímpicos de 2008.

Figura 16: (a) Fotografia da construção do estádio e (b) imagem representativa do sistema estrutural do estádio



Fonte: Arquitectura Viva (2024)

Outro fator levado em consideração na concepção do estádio foi o conforto dos usuários, para isso foram posicionadas por trás da fachada metálica painéis de ETFE (etil tetrafluoretileno) que tem como principal função filtrar a entrada de raios de luz e otimizar o isolamento acústico dentro do estádio (ARQUITECTURA VIVA, [s.d.]). O Ninho de Pássaro não só marcou um ponto de virada para a arquitetura esportiva, como também demonstrou o potencial de misturar técnicas tradicionais e modernas para criar soluções funcionais e visualmente impressionantes. Seu impacto cultural e arquitetônico permanece como um exemplo de como a biomimética pode inspirar projetos inovadores em escala global.

Por fim, a biomimética se destaca como uma abordagem valiosa na arquitetura contemporânea, oferecendo soluções criativas, eficientes e sustentáveis. Projetos como o Eastgate Building, o Council House 2 e Torre Eiffel mostram que é possível aplicar princípios naturais em grande escala, trazendo benefícios tanto para o meio ambiente quanto para os ocupantes. Essas construções exemplificam o potencial transformador da natureza na criação de espaços inovadores e ecologicamente responsáveis.

6 Conclusões

A partir desse estudo foi possível perceber a capacidade de aplicação da biomimética, sólidos celulares e design biofílico na arquitetura e as vantagens e ganhos que elas permitem em termos de desempenho, sustentabilidade e eficiência estrutural. A otimização do uso de materiais, resultado do estudo aprimorado de dispersão de cargas na estrutura, permite construções com o uso mínimo de materiais para atingir o desempenho desejado.

Porém, o uso reduzido dos materiais não implica necessariamente em projetos morfologicamente simples e sem qualidade estética, como observado na pesquisa, é possível atrelar beleza e eficiência estrutural. Ao utilizar a natureza como inspiração pode-se criar projetos complexos e dinâmicos, que possuem funcionalidade e formosura. Como possível continuação da pesquisa seria interessante aprofundar nos conceitos de otimização topológica, utilizando a biomimética como base, e softwares de modelagem e análise. Esse estudo visaria atrelar produção arquitetônica com os conhecimentos de engenharia no processo de concepção da forma, dando mais liberdade aos arquitetos para projetar morfologias complexas, e realizar análises estruturais de maneira simultânea, fazendo com que o processo criativo seja fluido.

Agradecimentos

Agradeço ao laboratório Conexão VIX da UFES, que disponibilizou os recursos tecnológicos e bibliográficos necessários para realização dessa pesquisa. E também aos meus orientadores Bruno Massara Rocha e Elisa Bomtempo Matos que acompanharam o processo de elaboração desse trabalho e contribuíram para seu desenvolvimento fornecendo orientações valiosas. Por fim gostaria de agradecer a UFES, a CAPES e a FAPES pelas bolsas de iniciação científica, de doutorado e de pesquisa concedidas a mim e aos orientadores sem as quais não seria possível realizar essa pesquisa.

Referências Bibliográficas

AHMETI, F. **Efficiency of Lightweight Structural Forms: The Case of Treelike Structures-** A comparative Structural Analysis. 2007.

AMER, N. **Biomimetic Approach in Architectural Education: Case study of ‘Biomimicry in Architecture’ Course.** Ain Shams Engineering Journal, v. 10, n. 3, p. 499–506, 1 set. 2019.

ARQUITECTURA VIVA. **National Stadium, Beijing - Herzog & de Meuron.** Disponível em: <https://arquitecturaviva.com/works/estadio-nacional-en-pekim-6#>. Acesso em: 28 jul. 2024.

BENYUS, Janine M. **Biomimética: Inovação Inspirada pela Natureza.** São Paulo: Cultrix, 1997.

BHATIA, A. **What Your Bones Have in Common With the Eiffel Tower.** Disponível em: <https://www.wired.com/2015/03/empzeal-eiffel-tower/>. Acesso em: 5 ago. 2024.

DOUNIA MOUJAHID. **The Trabeculae Pavilion – IAAC BLOG.** Disponível em: <https://blog.iaac.net/the-trabeculae-pavilion/>. Acesso em: 10 ago. 2024.

DURO-ROYO, J. et al. **MetaMesh: A hierarchical computational model for design and fabrication of biomimetic armored surfaces.** Computer-Aided Design, Material Ecology. v. 60, p. 14–27, 1 mar. 2015.

FORÉS-GARRIGA, A.; GÓMEZ-GRAS, G.; PÉREZ, M. A. **Additively manufactured three-dimensional lightweight cellular solids: Experimental and numerical analysis.** Materials & Design, v. 226, p. 111641, 1 fev. 2023.

GIBSON, L.; ASHBY, M. F. **Cellular Solids: Structure and Properties.** Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

GIBSON, L.J. **Cellular Solids.** MRS Bulletin 28, p. 270–274, 2003.

INSTITUT DU MONDE ARABE. **Architecture.** Disponível em: <https://www.imarabe.org/en/architecture>. Acesso em: 1 ago. 2024.

JIANG, H. et al. **Bioinspired multilayered cellular composites with enhanced energy absorption and shape recovery.** Additive Manufacturing, v. 36, p. 101430, 1 dez. 2020.

KO, W. H. et al. **The impact of a view from a window on thermal comfort, emotion, and cognitive performance.** Building and Environment, v. 175, p. 106779, 15 maio 2020.

NABONI, R.; BRESEGHELLO, L.; KUNIC, A. **Multi-scale design and fabrication of the Trabeculae Pavilion.** Additive Manufacturing, v. 27, p. 305–317, 1 maio 2019.

PEARCE, M. **Council House 2 Building. Melbourne.** Disponível em: <https://www.mickpearce.com/CH2.html>. Acesso em: 22 jul. 2024.

PEARCE, M. **Eastgate Building Harare.** Disponível em: <https://www.mickpearce.com/Eastgate.html>. Acesso em: 20 jul. 2024.

PINTOS, P. **30 St Mary Axe Tower / Foster + Partners.** Disponível em: <https://www.archdaily.com/928285/30-st-mary-axe-tower-foster-plus-partners>.

Psychological and physiological effects of a green wall on occupants: A cross-over study in virtual reality. Building and Environment, v. 204, p. 108134, 15 out. 2021.

RAINER STARK et al. **Sustainable Manufacturing Challenges, Solutions and Implementation Perspectives.** [s.l.] Cham Springer International Publishing Springer, 2017.

ROBERTS, T. We Spend 90% of Our Time Indoors. Says Who? [online]. 2016. Disponível em: <https://www.buildinggreen.com/blog/we-spend-90-our-time-indoors-says-who>. Acesso em: 19 mar. 2024.

SCHAEDLER, T. A.; CARTER, W. B. **Architected Cellular Materials**. Annual Review of Materials Research, v. 46, n. Volume 46, 2016, p. 187–210, 1 jul. 2016.

STRATH UNIVERSITY. **Successful Modern Day Examples of Biomimetics**. Disponível em: https://personal.strath.ac.uk/j.wood/Biomimetics/inspirational%20designs/Eiffel%20Tower_files/Eiffel%20Tower.htm. Acesso em: 20 ago. 2024.

Stuttgart Airport Structural Case Study. Disponível em: <https://www.rikysongsu.com/blog/2017/4/26/stuttgart-airport>. Acesso em: 20 jul. 2024.

TAVSAN, C.; TAVSAN, F.; SONMEZ, E. **Biomimicry in Architectural Design Education**. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 4th WORLD CONFERENCE on EDUCATIONAL TECHNOLOGY RESEARCHES (WCETR-2014). v. 182, p. 489–496, 13 maio 2015.

The potential of applying immersive virtual environment to biophilic building design: A pilot study. Journal of Building Engineering, v. 32, p. 101481, 1 nov. 2020.

TURNER, J. S. Evolutionary Architecture? Some Perspectives From Biological Design. *Architectural Design*, v. 82, n. 2, p. 28–33, mar. 2012.

UNIVERSITY OF STUTTGART. **BUGA Wood Pavilion 2019 | Institute for Computational Design and Construction | University of Stuttgart**. Disponível em: <<https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/buga-wood-pavilion-2019/>>. Acesso em: 12 jul. 2024

[WWW.FOSTERANDPARTNERS.COM](https://www.fosterandpartners.com), F. + P. /. **30 St Mary Axe | Foster + Partners**. Disponível em: <https://www.fosterandpartners.com/projects/30-st-mary-axe>. Acesso em: 10 jul. 2024.

ZHANG, B. et al. **Bioinspired basalt fiber composites with higher impact resistance through coupling sinusoidal and helical structures inspired by mantis shrimp**. International Journal of Mechanical Sciences, v. 244, p. 108073, 15 abr. 2023.

ZHONG, W.; SCHRÖDER, T.; BEKKERING, J. **Biophilic design in architecture and its contributions to health, well-being, and sustainability: A critical review**. Frontiers of Architectural Research, v. 11, n. 1, p. 114–141, 1 fev. 2022.