

## **Integração entre biomimética e tecnologia para construção de artefatos habitáveis: analisando o sistema TECLA de impressão 3D**

### ***Integration between biomimicry and 3D printing technology for building habitable artifacts: analyzing TECLA 3D printing system***

**Plácido Fernandes Caluete Neto.**

Placido.fernandes@ufpe.br

**Amilton José Vieira de Arruda.**

amilton.arruda@ufpe.br

Número da sessão temática da submissão – [5]

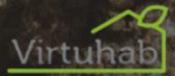
#### **Resumo**

Este artigo explora a integração dos princípios da biomimética com a tecnologia de impressão 3D para a construção de artefatos habitáveis, por meio do desenvolvimento do inovador sistema *TECLA*. Inicialmente, fundamenta-se em uma análise dos conceitos teóricos que embasam a imitação de processos naturais para aprimorar a eficiência e sustentabilidade na construção civil. Em seguida, o estudo apresenta a implementação prática dessa abordagem, pautada em modelagens computacionais e experimentações com protótipos. Os resultados alcançados evidenciam que o sistema *TECLA* é capaz de replicar estruturas inspiradas na natureza de maneira econômica, sustentável e adaptável, proporcionando significativas melhorias em termos de otimização de recursos e redução de custos. A conclusão da pesquisa indica o potencial transformador desta integração, ao mesmo tempo em que sugere direções futuras para expandir a aplicação dessa tecnologia em larga escala.

**Palavras-chave:** Biomimética; artefatos habitáveis; impressão 3D; sustentabilidade.

#### **Abstract**

*This article explores the integration of biomimicry principles with 3D printing technology for the construction of habitable artifacts through the development of the innovative TECLA system. Initially, it is based on an analysis of the theoretical concepts underlying the imitation of natural processes to enhance efficiency and sustainability in the construction industry. Following this, the practical implementation of this approach is presented, which is based on computational modeling and prototype experiments. The results demonstrate that the TECLA system is capable of replicating nature-inspired structures in an economical, sustainable, and adaptable manner, providing significant improvements in resource optimization and cost reduction. The study concludes by highlighting the transformative potential of this integration, while also suggesting future directions to expand the widespread application of this technology.*



**Keywords:** *Biomimicry; Habitable artifacts; 3D printing; sustainability.*

## 1. Introdução

A arquitetura expressa o desenvolvimento humano ao refletir transformações sociais e culturais de cada época, evidenciando a evolução histórica e as necessidades sociais na moldagem de espaços e relações (NAVARRETE, 2012). Entretanto, a construção civil amplia sua pegada de carbono pelo consumo excessivo de recursos naturais, emissão de gases de efeito estufa e degradação de habitats, com Ribeiro et al. (2022) apontando que mais de 50% dos resíduos gerados são descartados inadequadamente. Apesar dos impactos ambientais, o setor impulsiona o desenvolvimento econômico, representando 7% do PIB brasileiro e 13% globalmente (BARBOSA et al., 2017). Para mitigar esses efeitos, é necessária uma abordagem holística que, desde a escolha dos materiais até a manutenção dos edifícios, vise à regeneração dos ecossistemas e à melhoria da qualidade de vida (CORBELLA et al., 2003).

Paralelamente, os avanços da Indústria 4.0 têm modificado hábitos de consumo e relações sociais, incentivando o uso de práticas sustentáveis e materiais locais, biodegradáveis, reciclados e de baixa toxicidade (COLOMBO et al., 2008). Gonçalves et al. (2006) destacam o papel transformador da arquitetura e do design na criação de soluções inovadoras que promovam espaços mais harmoniosos e saudáveis. Assim, este artigo investiga a bioinspiração em construções industrializadas, com enfoque na fabricação digital – notadamente a impressão 3D – para o desenvolvimento de artefatos habitáveis. Os objetivos deste estudo consistem em:

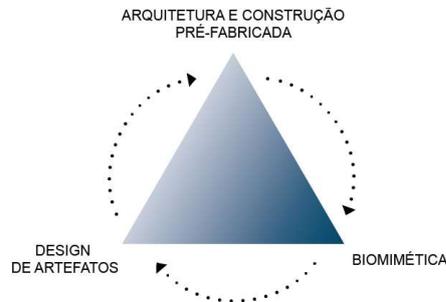
1. Integrar tecnologia e biomimética por meio do design bioinspirado;
2. Analisar a contribuição das estratégias bioinspiradas em projetos arquitetônicos e no design de artefatos habitáveis;
3. Investigar alternativas sustentáveis fundamentadas nos ensinamentos da natureza.

Este estudo foi estruturado de forma a sistematizar a abordagem dos desafios ambientais e sociais impostos pela construção civil nas últimas décadas. Na Introdução, o artigo apresenta o contexto e os desafios relacionados à pegada de carbono do setor, ressaltando a necessidade de uma abordagem holística que una práticas sustentáveis a inovações tecnológicas, como a bioinspiração e a impressão 3D. A revisão de literatura, abordada no primeiro capítulo, reúne os principais conceitos e estudos sobre sustentabilidade e fabricação digital, estabelecendo a base teórica para o trabalho.

O segundo capítulo, por sua vez, descreve de forma detalhada os procedimentos metodológicos adotados, incluindo os critérios de seleção dos materiais e a aplicação da técnica de impressão 3D, garantindo a transparência e a replicabilidade dos resultados. No terceiro capítulo, são apresentados os resultados obtidos e discutidas as vantagens e limitações das estratégias bioinspiradas, enfatizando seus impactos ambientais e sociais. Por fim, as considerações finais sintetizam os principais achados e sugerem direções para futuras investigações, evidenciando a importância da convergência entre sustentabilidade, tecnologia e inovação na construção civil contemporânea.

## 2. Fundamentação Teórica

A pesquisa sustenta-se em três áreas interligadas: arquitetura e construção industrializada, design de artefatos e biomimética (Figura 1). A construção industrializada fornece a base técnica e tecnológica, especialmente quando integrada à fabricação digital, que viabiliza a produção rápida e customizada de artefatos habitáveis. O design de artefatos incentiva práticas projetuais escaláveis, enquanto a biomimética inspira soluções inovadoras e sustentáveis, conectando formas naturais com os avanços tecnológicos.



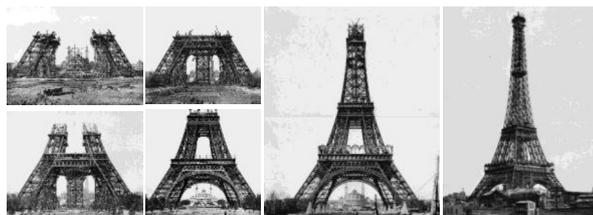
**Figura 1 - Tríade teórica. Fonte: Autores (2024).**

Essa confluência permite desenvolver diretrizes que otimizam a eficiência construtiva, elevam a qualidade do design e aprimoram a experiência do usuário, atendendo às atuais demandas de sustentabilidade e adaptabilidade. Conforme Benyus (2006), a união entre fabricação digital e construção industrializada inaugura um novo paradigma para criação de ambientes habitáveis, onde a tradição e a inovação se complementam para oferecer soluções ecoeficientes.

## 2.1. Construção Civil e o processo de industrialização

A construção industrializada possui raízes antigas, com os romanos empregando colunas e arcos para acelerar as edificações (SMITH, 2010). Contudo, a consolidação desse método ocorreu no século XX, impulsionada pela demanda habitacional pós-Segunda Guerra Mundial e pela fabricação de componentes em fábrica para montagem no local (KANG, 2016). Esse processo integra design e eficiência, evoluindo para um modelo que se adequa às novas exigências de espaço e sustentabilidade.

A Revolução Industrial, iniciada no final do século XVIII, transformou os métodos construtivos com inovações como o concreto armado e o aço laminado (GIEDION, 1991). No século XIX, o uso de ferro fundido e envidraçamento modular acelerou a urbanização e permitiu a exportação de kits construtivos, como exemplificado pela Torre Eiffel (Figura 2), cuja montagem envolveu peças pré-fabricadas erguidas por guindastes a vapor (FRAMPTON, 1997).



**Figura 2 - A Torre Eiffel, Gustave Eiffel. Etapas da construção. Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/802180/classicos-da-arquitetura-torre-eiffel-gustave-eiffel>.**

Atualmente, a integração da fabricação digital à construção industrializada potencializa a criação de artefatos habitáveis. Tecnologias de impressão 3D e processos digitais promovem a



customização, reduzem desperdícios e encurtam prazos de obra, mantendo a eficiência e a qualidade dos materiais (BARBOSA et al., 2017). Essa confluência de métodos tradicionais e inovações digitais oferece soluções sustentáveis e adaptáveis às demandas contemporâneas.

## 2.2. **Cultura Digital na arquitetura e design de artefatos habitáveis**

A cultura digital na arquitetura e no design de artefatos habitáveis tem se consolidado como vetor de inovação e sustentabilidade. Recentemente, a demanda por soluções habitacionais que sejam sustentáveis, econômicas e inovadoras estimulou o desenvolvimento de artefatos pré-fabricados com design compacto, versátil e customizável (SMITH, 2017). Nesse cenário, os conceitos de Mundo Híbrido e Cultura Digital emergem como essenciais, ao integrar processos virtuais e físicos por meio da fabricação digital, o que confere precisão, customização e agilidade à produção, transformando a concepção dos espaços (KOLAREVIC, 2012).

As mudanças sociais atuais, que valorizam um estilo de vida consciente e em harmonia com o meio ambiente, têm impulsionado o uso de materiais sustentáveis e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras (YUDELSON, 2018), otimizando os processos construtivos e viabilizando a implementação rápida de soluções emergenciais. Historicamente, os espaços habitáveis foram moldados pelo ambiente, pela disponibilidade de recursos e pelos avanços tecnológicos, como exemplifica Giedion (1991) ao ilustrar a evolução dos materiais e dos métodos construtivos desde as primeiras moradias até o advento da Revolução Industrial.

A integração entre métodos tradicionais e tecnologias digitais, especialmente a fabricação digital, tem impulsionado a inovação no design arquitetônico ao proporcionar maior precisão, customização e a convergência entre tradição e modernidade, conforme destaca Kolarevic (2012). Tecnologias de impressão 3D e processos digitais aplicados à construção industrializada potencializam a criação de artefatos habitáveis ao reduzir desperdícios, encurtar prazos e manter a eficiência e a qualidade dos materiais (BARBOSA et al., 2017), oferecendo soluções sustentáveis e adaptáveis às demandas contemporâneas, sobretudo quando combinadas com estratégias biomiméticas.

## 2.3. **O potencial da Biomimética para o futuro da construção industrializada**

A biomimética utiliza processos naturais para solucionar desafios humanos (SOARES, 2008), transformando a construção industrializada por meio do desenvolvimento de materiais e estruturas sustentáveis. Inspirada por elementos naturais, como conchas e ossos (MUTLU AVINÇ, 2023), essa abordagem, integrada ao design bioinspirado e à fabricação digital, reduz desperdícios e otimiza recursos (ARRUDA, 2021). Estudos demonstram sua aplicação prática. Por exemplo, a utilização da geometria fractal para otimizar a distribuição de materiais é mostrada na Figura 3.



Figura 3 - Exemplos de geometria fractal encontradas na natureza. Fonte: [myplanet.pt/fractais/](http://myplanet.pt/fractais/). Acessado em 28/04/2024.

O potencial desse conceito para o futuro da construção industrializada é evidenciado tanto em estudos experimentais quanto em análises históricas. Pesquisas realizadas no *Labdesign* da Universidade Federal de Pernambuco demonstram que os fundamentos biônicos e biomiméticos viabilizam a criação de ecomateriais inovadores, como superfícies autolimpantes inspiradas na folha de lótus, que podem contribuir para construções mais sustentáveis (SOARES et al., 2018). Segundo Pawlyn (2016), a adoção dessa abordagem requer uma compreensão profunda dos processos naturais, o que possibilita revolucionar o desenho de espaços habitáveis por meio da maximização dos recursos e da minimização dos desperdícios.

Historicamente, o Crystal Palace (Figura 4), idealizado por Joseph Paxton para a Grande Exposição de 1851, em Londres, ilustra essa influência ao representar um marco na construção industrializada: sua estrutura em ferro e vidro, produzida em escala industrial, aliada a uma concepção inspirada na natureza, evidencia os primórdios da integração de princípios biomiméticos à arquitetura. Dessa forma, a biomimética surge como um importante vetor de inovação e sustentabilidade, abrindo caminhos para o desenvolvimento de soluções construtivas que respondam de maneira eficaz aos desafios contemporâneos.



Figura 4 - O Crystal Palace (Joseph Paxton). Fonte: <http://letras.cidadescriativas.org.br/2020/11/19/o-palacio-de-cristal-1851/>. Acessado em 20/03/2024.

Utilizando vastas quantidades de vidro e ferro fundido industrializados, Paxton inspirou-se na folha da vitória-régia (Figura 6), para em poucos meses projetar a estrutura dos arcos principais da edificação. Além de impressionar impressionaram pela inovação técnica, a coordenação modular e a eficiência da construção também demonstraram o potencial da industrialização para reduzir significativamente o tempo de construção sem comprometer a estabilidade ou a estética arquitetônica (BRAND, 1994).

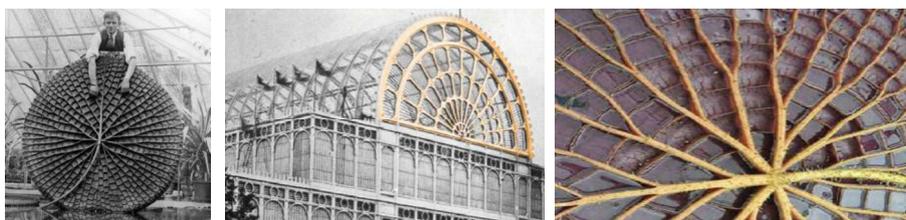


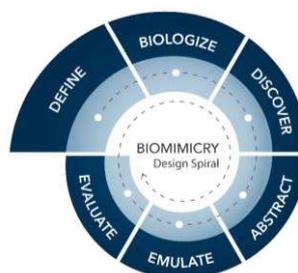
Figura 5 - Joseph Paxton, elemento do Crystal Palace e detalhe da folha da vitória-régia. Fonte: <http://letras.cidadescriativas.org.br/2020/11/19/o-palacio-de-cristal-1851/>. Acessado em 20/03/2024.

Além disso, a utilização de ferramentas digitais, como o design paramétrico, permite a customização e a eficiência na construção. Segundo Tamke e Fischer (2020), a integração do design bioinspirado com tecnologias inovadoras – por exemplo, o uso de robótica na criação de formas complexas (Figura 5) evidencia o potencial da biomimética para proporcionar soluções inteligentes e sustentáveis. Assim, a biomimética vai além da simples imitação: ela oferece uma referência fundamental da natureza para o desenvolvimento de projetos eficientes e sustentáveis, integrando dimensões funcionais, cognitivas e emocionais na experiência do ambiente construído (PAWLYN, 2011; HENSEL et al., 2010).



**Figura 6 - Processo de Design e criação do Pavilhão de Pesquisa do ICD-ITKE 2013-14. Stuttgart, Alemanha. Fonte: ICD-ITKE 2013-14/ Achim Menges.**

Em consonância com as novas demandas da *Quarta Revolução Industrial*, a biomimética desponta como estratégia essencial para a criação de soluções construtivas sustentáveis e eficientes. Essa abordagem integra os processos naturais aos métodos de fabricação digital, permitindo o desenvolvimento de materiais e estruturas que reduzem o desperdício e otimizam os recursos. Ao imitar sistemas biológicos, a biomimética inspira a criação de ecomateriais inovadores – como superfícies autolimpantes inspiradas na folha de lótus, demonstradas em estudos de Soares et al. (2018). A metodologia conhecida como “Espiral do Design”, proposta pelo Biomimicry Institute (2024), oferece um processo sistematizado que vai da identificação do desafio à avaliação do conceito, conforme apresentado na Figura 7.



**Figura 7 - Processo de Design Biomimético (Espiral de Design). Fonte: <https://toolbox.biomimicry.org/methods/process/>. Acessado em 28/04/2024.**

A importância dos sistemas fechados — que imitam ecossistemas autossuficientes, reciclando energia, água e materiais — é defendida por Guallart (2010). Benyus (2006) ressalta que a natureza pode ser vista como modelo, medida e mentora, ampliando os horizontes do design por meio da incorporação de geometrias otimizadas e mecanismos de autorregulação. Além dos ganhos funcionais e morfológicos, a presença de formas biomórficas gera respostas emocionais positivas, contribuindo para ambientes mais harmoniosos e confortáveis (PAWLYN, 2011; HENSEL; MENGES, 2010). Assim, a fusão da biomimética com a fabricação digital redefine o conceito de construção industrializada, promovendo inovações que alinham eficiência técnica, sustentabilidade e bem-estar dos usuários.

### 3. Procedimentos Metodológicos

A pesquisa exploratória e qualitativa distribuiu-se em três etapas, alinhadas aos objetivos específicos, com ênfase na integração da fabricação digital à construção industrializada para a criação de artefatos habitáveis sustentáveis. Primeiramente, realizou-se uma revisão de literatura que fundamentou os temas dos artefatos habitáveis, da biomimética e da interseção entre tecnologia e construção, conforme apontado por Martins e Oliveira (2022).

Em seguida, examinou-se o estudo de caso do sistema TECLA (2021) – projeto que utiliza impressão 3D e materiais locais na construção de habitações – visando definir parâmetros de projeto. Gil (2008) ressalta que estudos de caso possibilitam a análise de fenômenos em seu contexto por meio de fontes secundárias, como documentos e desenhos técnicos. A escolha do projeto TECLA deveu-se à sua base nos princípios biomiméticos, que envolvem processos multidisciplinares e tecnológicos.

Para avaliação, adotou-se a abordagem *top-down* proposta por Alexander (1977), partindo de uma visão macro e aplicando engenharia reversa para abstrair atributos biomiméticos, identificando as interfaces entre arquitetura, design e engenharia. Por fim, implementou-se a metodologia de projeto *Life's Principles* do *Biomimicry 3.8* – ilustrada pelo diagrama “Princípios da Vida” – para definir parâmetros em projetos bioinspirados de habitações industrializadas, objetivando soluções inovadoras inspiradas na natureza e contribuindo para construções sustentáveis e eficientes.



Figura 8 - Diagrama *Life's Principles* – *Biomimicry 3.8*. Fonte: <https://www.biomimicry.net/the-buzz/resources/lifes-principles-cards/>. Traduzido pelos autores.

Adicionalmente, o método estruturado segundo o *Biomimicry 3.8* integrou análise crítica e propostas de melhorias com base em princípios bioinspirados. A seguir, apresenta-se um quadro compacto com as etapas metodológicas:

**Quadro 1: Etapas metodológicas segundo o *Biomimicry 3.8*.**

Aspecto	Descrição
1. Identificação do Contexto e Escopo	Delimitação do universo da construção industrializada e artefatos habitáveis integrados à fabricação digital.
2. Revisão dos Princípios de <i>Biomimicry 3.8</i>	Estudo dos <i>Life's Principles</i> para orientar o design bioinspirado (BENYUS, 2006; HENSSEL; MENGES, 2010).
3. Coleta de Dados	Levantamento de informações por meio de documentos, imagens, desenhos técnicos e publicações digitais.
4. Avaliação do Desempenho	Análise dos atributos biomiméticos identificados via abordagem <i>top-down</i> (ALEXANDER, 1977), destacando eficiência e sustentabilidade.
5. Identificação de Estratégias Bioinspiradas	Abstração de padrões naturais e seus paralelos com a construção industrializada e a fabricação digital.
6. Documentação e Apresentação dos Resultados	Sistematização dos achados e construção de quadros-síntese que evidenciam a integração dos princípios biomiméticos.
7. Conclusões e Recomendações	Síntese dos resultados e proposição de estratégias para aprimorar projetos de construções sustentáveis.

Fonte: Autores (2025).

Essa metodologia permitiu identificar estratégias adaptáveis e bioinspiradas no sistema *TECLA*, evidenciando os benefícios da união entre fabricação digital, construção industrializada e os conceitos biomiméticos para o desenvolvimento de artefatos habitáveis. Essa abordagem revela vantagens em eficiência, adaptação e sustentabilidade, contribuindo para a evolução dos métodos construtivos não convencionais e para o atendimento de demandas por ambientes ecologicamente sustentáveis.

## 4. Resultados

### 4.1. Estudo de caso: o Sistema *TECLA*

O sistema *TECLA* (Figura 9), fruto da parceria entre Mario Cucinella Architects e *WASP* (World's Advanced Saving Project), apresenta um modelo inovador de habitação circular. Localizado em Massa Lombarda, Ravena, Itália, o projeto utiliza impressão 3D e materiais locais, como terra crua, para oferecer soluções sustentáveis e de baixo carbono. O protótipo pode ser concluído em 72 horas, reduzindo significativamente resíduos e emissões.



**Figura 9 - Unidade habitacional do sistema *TECLA*. Fonte: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/> Acessado em 24/06/24.**

A metodologia utilizada na investigação e desenvolvimento do *TECLA* seguiu os princípios da biomimética, conforme definido pelo Biomimicry Institute. A aplicação de tecnologias modernas para transformar um material antigo em habitações eficientes e adaptáveis mostra uma profunda conexão entre a ciência contemporânea e a sabedoria tradicional, um aspecto fundamental da biomimética. A Vespa oleira, também conhecida como vespa-cabocla ou vespa-do-barro, destaca-se pela habilidade de construir ninhos utilizando barro (Figura 10).

Nesse ambiente, depositam seus ovos e armazenam presas paralisadas para alimentar as futuras larvas.



Figura 10 - Vespa oleira e construção do Abrigo. Fonte: <https://www.biodiversity4all.org/taxa/119344-eumeninae>. Acessado em 14/06/24.

Inspirado no comportamento do animal, que coleta e molda barro para criar estruturas resistentes, o sistema *TECLA* adapta essa estratégia natural para desenvolver artefatos habitáveis sustentáveis. O design do projeto alia práticas vernáculas, estudos bioclimáticos e o uso de materiais naturais, equilibrando massa térmica, isolamento e ventilação conforme as condições climáticas. Essencialmente, a lógica construtiva das vespas é aplicada à construção industrializada por meio da fabricação digital – por meio de impressão 3D com argila para criar habitações seguras e sustentáveis a partir de materiais abundantes, como a terra crua, que possui excelentes propriedades térmicas e acústicas, permitindo o desenvolvimento de formas complexas e orgânicas adaptadas ao clima local.

A tecnologia utilizada é a Crane *WASP*, a primeira impressora 3D modular e multinível do mundo, capaz de construir módulos habitacionais colaborativamente em cerca de 200 horas, com consumo médio inferior a 6 kW (Figura 11). Essa integração entre fabricação digital e construção industrializada evidencia o potencial dos processos bioinspirados para transformar a criação de artefatos habitáveis, promovendo soluções inovadoras e ecologicamente responsáveis (BENYUS, 2006).

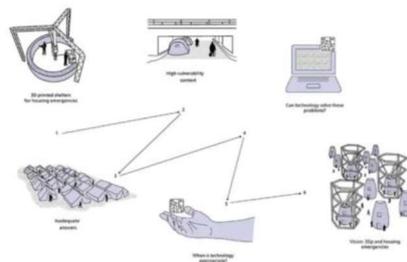


Figura 11 - Diagrama funcional do processo de impressão 3D. Fonte: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/> Acessado em 24/06/24.

Desde sua concepção, o *TECLA* destaca uma abordagem multidisciplinar envolvendo arquitetura, engenharia e ciências dos materiais. A pesquisa sobre eco-sustentabilidade foi conduzida pela SOS – School of Sustainability, com projetos pioneiros liderados por Mario Cucinella Architects e a tecnologia colaborativa da *WASP*. Cada unidade possui uma área de aproximadamente 60 m<sup>2</sup>, capaz de construir elementos contínuos, formando soluções compactas e resilientes (Figura 12). A utilização de terra local reforça o caráter de baixo carbono do projeto.



**Figura 13 - Impressão 3D de parede de uma unidade TECLA. Fonte: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/> Acessado em 24/06/24.**

Conforme Cucinella, além de explorar soluções formais estéticas para a habitação, o projeto também observou a forma do edifício em relação ao seu clima e latitude. Além disso, os pesquisadores da *WASP* (2021) destacam que a Crane *WASP* otimiza movimentos, evita acidentes e garante uma operação suave por meio de um software avançado (Figura 13).



**Figura 12 - Vista aérea da Crane WASP e o processo de impressão 3D de uma unidade TECLA. Fonte: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/> Acessado em 24/06/24.**

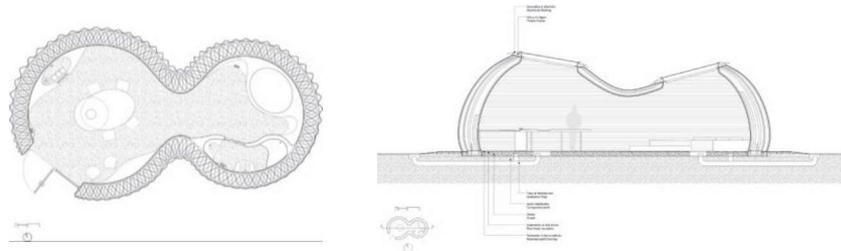
A utilização de terra crua local reduz resíduos e melhora a eficiência energética. Moretti (2021) destaca que, “ao usar a terra (barro) como material de construção e observar o design da carcaça em termos de desempenho mecânico e térmico, a quantidade de resíduos e emissões de carbono é grandemente reduzida.” A composição da mistura de terra é ajustada às condições climáticas, otimizando massa térmica, isolamento e ventilação. A Figura 14 ilustra o sistema, que aproveita a ventilação natural pelo efeito chaminé, iluminação zenital e captação/drenagem de águas pluviais, evidenciando a aplicação eficiente da arquitetura bioclimática.



**Figura 14 - Corte longitudinal perspectivado de uma unidade TECLA. Fonte: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/> Acessado em 24/06/24.**

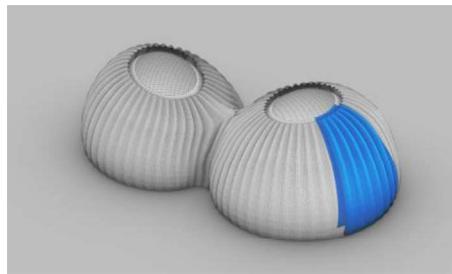
O projeto busca criar comunidades *off-grid* inteligentes, integrando sustentabilidade e tecnologia em habitações compactas de aproximadamente 60 m<sup>2</sup>. Essa proposta alia a fabricação digital à construção industrializada, possibilitando que as unidades habitacionais autoproduzam, distribuam e circulem água, energia e resíduos. A solução arquitetônica conta com uma casca composta por dois elementos contínuos com claraboias circulares, representando uma abordagem bioinspirada que otimiza a eficiência mecânica e térmica – conceito alinhado aos princípios apresentados por Benyus (2006).

Além disso, o uso de uma camada externa ventilada, combinado ao isolamento mediante o preenchimento com cascas de arroz, demonstra a convergência entre técnicas vernáculas e inovações tecnológicas para soluções habitacionais sustentáveis. A inclusão de um lago para recuperação de água reforça o compromisso com a formação de ecossistemas resilientes. A Figura 15 ilustra a proposta arquitetônica desta unidade habitacional, destacando a integração entre fabricação digital, construção industrializada e os novos paradigmas de artefatos habitáveis (MARTINS; OLIVEIRA, 2022).



**Figura 15 - Planta Baixa e Seção Longitudinal da unidade habitacional TECLA. Fonte:** <https://www.archdaily.com/960714/tecla-technology-and-clay-3d-printed-house-mario-cucinella-architects>. Acessado em 24/0624.

Constituída por dois módulos contínuos que culminam em claraboias circulares (Figura 16), a edificação introduz luz zenital natural, elevando o conforto lumínico. Ballarotti e Cunto (2018) destacam como a abordagem de Mario Cucinella, ao utilizar materiais locais, cria habitações sustentáveis, adaptáveis e resilientes – similar à construção de ninhos realizada pelas vespas-oleiras.

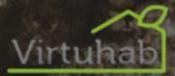


**Figura 16 - Modelo digital de uma unidade TECLA com detalhe de uma sessão de parede a ser impressa. Fonte:** <https://www.archdaily.com/960714/tecla-technology-and-clay-3d-printed-house-mario-cucinella-architects>. Acessado em 24/0624.

A forma autoportante otimizada da estrutura aumenta a eficiência mecânica e a estabilidade, enquanto a impressão 3D possibilita uma construção rápida e com menor geração de resíduos. A análise do projeto, segundo os métodos do Biomimicry Institute, apoia-se em três eixos principais:

1. Emulação: Inspiração direta no comportamento das vespas, especialmente a vespa oleira, ao mimetizar seu processo construtivo.
2. Ethos: Foco na sustentabilidade e na baixa emissão de carbono, por meio do uso de matérias-primas locais que minimizam o impacto ambiental.
3. (Re)conexão: Integração harmoniosa da edificação ao entorno natural, utilizando recursos locais.

Esses métodos mostraram-se eficazes na avaliação de uma habitação compacta que assegura conforto térmico e eficiência energética. Conforme Benyus (1997), a inovação sustentável inspirada na natureza resolve problemas humanos. O sistema *TECLA* representa assim, um notável exemplo de design bioinspirado que integra tradição e tecnologia, oferecendo soluções habitacionais eficientes e resilientes para o enfrentamento das demandas sociais e a crise



climática, demonstrando o potencial futuro das construções industrializadas produzidas por meio de fabricação digital.

#### 4.1.1 *Identificação do contexto de escopo da avaliação*

O sistema *TECLA*, desenvolvido em parceria entre Mario Cucinella Architects e *WASP*, é um projeto inovador de habitações circulares localizado na Itália. Combinando fabricação digital e construção industrializada, o projeto utiliza impressão 3D e materiais locais, como a terra crua, para edificar habitações de baixo carbono em apenas 72 horas. Inspirado pelo comportamento das vespas-oleiras, o design integra práticas vernaculares, princípios climáticos e uma abordagem biomimética – fundamentada na emulação e reconexão com a natureza –, evidenciando eficiência energética, adaptabilidade, sustentabilidade e resiliência (BRAND, 1994; BENYUS, 2006).

#### 4.1.2 *Objetivo da avaliação*

A avaliação do *TECLA*, baseada nos *Life's Principles* do *Biomimicry 3.8*, tem como metas:

1. Explorar a interface entre hibridismo cultural, biomimética e design bioinspirado para soluções habitacionais inovadoras;
2. Investigar a aplicabilidade de estratégias bioinspiradas na prática de projetos para artefatos habitáveis, integrando fabricação digital e construção industrializada;
3. Analisar alternativas que, inspiradas pela natureza, promovam a sustentabilidade global e permitam escalabilidade em diferentes contextos.

#### 4.1.3 *Revisão dos Princípios de Biomimicry 3.8 em Arquitetura*

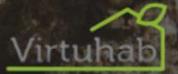
##### 4.1.3.1 Familiarização com os Princípios da Biomimicry 3.8

Os *Life's Principles* orientam o design sustentável, baseando-se na adaptação dos seres vivos, no uso eficiente dos recursos e na promoção de ciclos regenerativos (BENYUS, 2006).

##### 4.1.3.2 Relevância dos Princípios para o estudo.

No contexto do *TECLA*, os princípios aplicados são:

1. Evoluir para Sobreviver: Emprego de materiais locais e técnicas adaptativas.
2. Adaptar-se às Condições Locais: Impressão 3D ajustada às especificidades do terreno e clima.
3. Eficiência no Uso de Materiais e Energia: Construção de baixo impacto por meio da fabricação digital.
4. Desenvolvimento e Crescimento Integrados: Modularidade que possibilita expansão com mínimo impacto.
5. Apoiar-se na Diversidade: Combinação de práticas vernaculares com inovações tecnológicas.
6. Promover Cooperação: Parcerias que aliam conhecimento técnico e envolvimento comunitário.



#### 4.1.4 *Coleta de Dados*

Foram analisados desenhos arquitetônicos, especificações técnicas, diagramas, ilustrações 3D e publicações digitais.

#### 4.1.5 *Avaliação do Desempenho do Projeto segundo Princípios Biomiméticos*

1. Adaptabilidade ao Ambiente
  - Descrição: O design do *TECLA* remete à adaptabilidade das vespas-oleiras, pois utiliza terra crua para construir estruturas que se integram ao ambiente.
  - Inspiração natural: Tal como as vespas ajustam seus ninhos com materiais disponíveis, o projeto adapta-se harmonicamente ao entorno.
2. Eficiência Energética
  - Descrição: A abertura zenital favorece a ventilação natural e a entrada de luz, reduzindo a necessidade de sistemas artificiais.
  - Inspiração natural: Inspirado em tocas e cupinzeiros, que otimizam a circulação de ar e a regulação térmica.
3. Uso de Materiais
  - Descrição: A utilização da impressão 3D permite a otimização topológica, reduzindo o uso de material e garantindo resistência estrutural.
  - Inspiração natural: Remete aos padrões fractais, como as nervuras das folhas, que maximizam a eficiência estrutural.
4. Resiliência e Durabilidade
  - Descrição: O padrão impresso em 3D confere alta resiliência, imitando a robustez de estruturas naturais.
  - Inspiração natural: Evoca a resistência das carapaças de crustáceos e a durabilidade dos ninhos de vespas.
5. Ciclo de Vida e Sustentabilidade
  - Descrição: O emprego de materiais biodegradáveis, como a terra crua, possibilita a reciclagem e a reintegração do material ao meio ambiente ao final da vida útil.
  - Inspiração natural: Assim como folhas que se decompõem e enriquecem o solo, as habitações *TECLA* promovem um ciclo fechado e sustentável.

#### 4.1.6 *Identificação de Estratégias de Design Bioinspirado*

O *TECLA* adota estratégias bioinspiradas que unem fabricação digital e construção industrializada para criar artefatos habitáveis adaptáveis e eficientes. A impressão 3D em terra crua confere propriedades térmicas similares às tocas de animais, mantendo a estabilidade interna. O uso de recursos locais reflete a eficiência dos organismos naturais – como as conchas dos moluscos –, possibilitando estruturas robustas com baixo impacto ambiental. Essa abordagem promove a modularidade e permite a desconstrução e reciclagem dos materiais, alinhando-se com os princípios dos ciclos regenerativos da natureza.

#### 4.1.7 *Sugestões para Melhoria*

Apesar de todo potencial e virtudes apontadas no projeto, é importante pensar sempre no aprimoramento da solução e os processos que a envolvem. Dentre as possíveis melhorias a serem promovidas, é possível elencarmos:

- a. Engajamento Comunitário Ampliado: Promover workshops e treinamentos em técnicas de impressão 3D com materiais locais para fortalecer a autossuficiência e disseminar conhecimento sustentável.
- b. Integração de Soluções *Off-grid*: Implementar sistemas de captação de água da chuva, tratamento de resíduos e geração de energia solar, visando a independência completa das habitações.
- c. Pesquisa e Desenvolvimento Contínuo: Investir em estudos para aprimorar a eficiência dos materiais e métodos de impressão 3D, buscando novas combinações que ampliem a sustentabilidade e a resistência das construções.

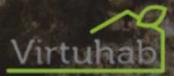
#### 4.1.8 Documentação e apresentação dos resultados

Para o projeto-sistema *TECLA*, realizou-se uma análise detalhada utilizando os *Life's Principles*, do *Biomimicry 3.8*. Inspirado nos ninhos da vespa oleira, o projeto, que integra fabricação digital (por meio da impressão 3D) à construção industrializada, emprega materiais locais, como a terra crua, para desenvolver artefatos habitáveis inovadores e sustentáveis. A seguir, apresenta-se um quadro-síntese compacto dos resultados:

**Quadro 1: Quadro-síntese do sistema *TECLA*.**

<b>Critério</b>	<b>Descrição</b>	<b>Relação com os <i>Life's Principles</i></b>
Abordagem Bioinspirada	Design que imita o comportamento da vespa oleira, integrando forma e processo para promover sustentabilidade.	Replicação de processos naturais para otimização (BENYUS, 2006).
Solução Estrutural	Estrutura otimizada com padrões fractais, melhorando a distribuição de tensões.	Inspiração em padrões naturais eficientes, como os girassóis (PAWLYN, 2011).
Sistemas Construtivos e Pré-fabricação	Uso de módulos pré-fabricados que permitem montagem rápida e minimização de resíduos.	Analogamente à montagem dos ninhos de vespas, que são adaptáveis e modulares.
Materiais da Estrutura	Emprego de terra crua, material local e sustentável, com excelentes propriedades térmicas.	Utilização de recursos renováveis, conforme observado na natureza (GUALLART, 2010).
Materiais da Envoltória	Aplicação de dupla camada para isolamento térmico e acústico, garantindo microclimas internos favoráveis.	Similar às camadas isolantes naturais, como a pele de alguns animais (HENSSEL; MENGES, 2010).
Tipo de Coberta	Abertura zenital que maximiza a entrada de luz natural e promove ventilação eficiente.	Regulação ambiental inspirada em folhas que modulam a entrada de luz e ar.
Esquadrias e Estanqueidade	Projeto que impede infiltrações, permitindo a troca gasosa e mantendo a integridade estrutural.	Eficiência adaptativa, similar à proteção natural presente em cascas e conchas (BRAND, 1994).
Modularidade e Customização	Estrutura personalizável e reconfigurável, adaptável conforme as necessidades dos usuários.	Analogamente à plasticidade dos organismos que ajustam suas estruturas conforme o ambiente.
Gestão de Recursos ( <i>off-grid</i> )	Integração de sistemas de energia solar e captação de água da chuva, promovendo autossuficiência.	Uso otimizado dos recursos locais, espelhando ecossistemas naturais.
Resiliência e Durabilidade	Estruturas robustas projetadas para resistir a condições climáticas adversas e apresentar longa vida útil.	Adaptação e persistência similares à resistência observada em organismos naturais

Fonte: Autores (2025).



O quadro apresenta uma análise minuciosa do projeto *TECLA*, evidenciando como cada critério se alinha aos princípios da biomimética segundo o *Biomimicry 3.8*. Essa abordagem destaca a eficiência, sustentabilidade e adaptabilidade na construção de habitações pré-fabricadas, ilustrando de forma clara a integração dos "*Life's Principles*" no desenvolvimento do projeto.

#### 4.1.9 Conclusões e Recomendações

O projeto *TECLA* comprova o potencial do design bioinspirado na arquitetura industrializada. Ao utilizar princípios naturais e a metodologia *Biomimicry 3.8*, o estudo demonstra que é possível criar ambientes residenciais resilientes, eficientes e sustentáveis. Assim, recomenda-se a ampliação dessa estratégia em futuras soluções habitacionais resilientes e ambientalmente corretas.

### 5. Discussões

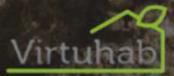
Os resultados do *TECLA* evidenciam uma convergência promissora entre artefatos habitáveis, construção industrializada com fabricação digital e biomimética. A otimização espacial e a integração de estratégias de conforto ambiental demonstram que é possível enfrentar os desafios residenciais contemporâneos de forma sustentável (Santos, 2018). A utilização de técnicas de fabricação digital do sistema, como a impressão 3D, comprova a eficácia da industrialização ao reduzir desperdícios, agilizar os processos construtivos e permitir customizações em larga escala (Almeida et al., 2019). Paralelamente, a abordagem biomimética – inspirada na modularidade e eficiência dos sistemas naturais – aprimora a distribuição de materiais e eleva a eficiência energética dos projetos (Ferreira, 2020). Essa sinergia entre tecnologia digital, métodos industrializados e princípios naturais estabelece uma perspectiva inovadora para a criação de artefatos habitáveis eficientes e sustentáveis.

### 6. Considerações Finais

A presente pesquisa destaca o potencial revolucionário que o design bioinspirado possui para a construção industrializada, integrando sustentabilidade às inovações da *Indústria 4.0*. A análise do estudo de caso evidencia o potencial do design paramétrico bioinspirado para o desenvolvimento de artefatos habitáveis compactos, demonstrando a necessidade de repensar e aprimorar os métodos construtivos tradicionais.

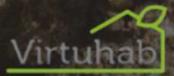
A convergência entre artefatos habitáveis, processos industriais e práticas sustentáveis pode redefinir o cenário da construção civil. Ademais, Almeida e Souza (2019) apontam que técnicas de fabricação digital, como a impressão 3D, reduzem desperdícios, aceleram os processos e permitem customizações em larga escala. A abordagem biomimética, inspirada na eficiência dos sistemas naturais, por sua vez, equilibra a distribuição dos materiais e eleva a eficiência energética das edificações.

Em síntese, os dados indicam que a integração entre biomimética e tecnologias digitais favorece a criação de construções mais eficientes e com menor impacto ambiental, contribuindo para soluções construtivas inovadoras e sustentáveis. Essa perspectiva interdisciplinar, que alia tradição e inovação, revela-se indispensável para a evolução das práticas na construção civil.



## Referências

- 3D WASP. Disponível em: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/> Acessado em 24/06/24.
- ALEXANDER, Christopher, et al. *A Pattern Language: towns, buildings, construction*. Oxford University Press, 1977.
- ALMEIDA, Maria; SOUZA, Pedro. Impressão 3D na construção civil: eficiência e customização em larga escala. *Anais do Congresso Brasileiro de Construção Digital*, p. 120-134, 2019.
- ARRUDA, Amilton; LANGELLA, Carla. Prólogo. BioDiseño, Innovación y Transdisciplinarietà. *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. Ensayos*, n. 149, p. 25-35, 2021.
- ASK NATURE. Disponível em: <https://asknature.org/>
- BARBOSA, Filipe; WOETZEL, Jonathan; MISCHKE, Jan. Reinventing construction: A route of higher productivity. *McKinsey Global Institute*, 2017.
- BARBOSA, W. C. et al. *Tecnologias Digitais na Construção Industrializada: Sustentabilidade e Eficiência*. São Paulo: Editora de Engenharia, 2017
- BENYUS, Janine M. *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. Harper Perennial, New York, 2006.
- Biomimicry Institute. (n.d.). *Biomimicry Innovation Methodology*. Disponível em: <https://biomimicry.org/>. Biomimicry Institute. 2024.
- BRAND, S. *How buildings learn: what happens after they're built*. Penguin Books, 1994.
- COLOMBO, L. O. R.; FAVOTO, T. B.; CARMO, S. N. A evolução da sociedade de consumo. *Akrópolis, Umarama*, v. 16, n. 3, p. 143-149, jul./set. 2008
- CORBELLA, O.; YANNAS, S. Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental. *Rio de Janeiro: Revan*, 2003.
- FERREIRA, Ana. Biomimética e eficiência energética: lições da natureza aplicadas à arquitetura. *Revista de Design Bioinspirado*, v. 5, n. 1, p. 25-40, 2020.
- FRAMPTON, K. *História Crítica da Arquitetura Moderna*. São Paulo: Martins Fontes, 1997.
- GIEDION, Joseph. *A arquitetura e a era das máquinas*. São Paulo: Cosac & Naify, 1991.
- GIEDION, S. *Space, Time and Architecture: The Growth of a New Tradition*. Cambridge: Harvard University Press, 1991.
- GIL, Antonio Carlos. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. São Paulo: Atlas. 2008.
- GONÇALVES, Joana Carla Soares; DUARTE, Denise Helena Silva. *Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino*. *Ambiente construído*, v. 6, n. 4, p. 51-81, 2006.
- GUALLART, V. *Self-Sufficient City: Envisioning the Habitat of the Future*. Actar, 2010.
- KANG, Shao-Bo; TAN, Kang Hai. Robustness assessment of exterior precast concrete frames under column removal scenarios. *Journal of Structural Engineering*, v. 142, n. 12, p. 04016131, 2016.



- KOLAREVIC, Branko. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Chichester: John Wiley & Sons, 2012.
- KOLAREVIC, Branko. *Digital Design and Manufacturing in Architecture, Engineering and Construction*. New York: Wiley, 2012.
- MUTLU AVINÇ, Güneş; YILDIZ, Aslı. A bibliometric and systematic review of scientific publications on metaverse research in architecture: web of science (WoS). *International Journal of Technology and Design Education*, p. 1-25, 2024.
- NAVARRETE, R. D. L. (2012). A arquitetura na perspectiva da evolução do espaço-tempo. *Sociedade em Debate*, 4(2), 113-130.
- PAWLYN, I. *Biomimetic Design in Architecture*. Chichester: John Wiley & Sons, 2016.
- RIBEIRO, H., Cardoso, J., & Silva, M. (2022). "Sustainable Technologies in Civil Construction." *Journal of Sustainable Building Solutions*.
- SANTOS, Maria. *Design e Inovação na Arquitetura Modular*. São Paulo: Editora Senac, 2015.
- SANTOS, João. Habitação industrializada e biomimética: convergências para o futuro sustentável. *Revista de Arquitetura Sustentável*, v. 10, n. 2, p. 45-60, 2018.
- SMITH, J. *Bioinspiration in Architecture*. London: RIBA Publishing. 2010.
- SMITH, John. *Innovation in Prefabricated Housing*. [S.l.]: [s.n.], 2017.
- SMITH, R. E. *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. John Wiley & Sons, Inc. 2010.
- SMITH, J. *Prefabricated Design in Contemporary Architecture*. Nova York: Routledge, 2017
- SOARES, M. A. R. *Biomimetismo e Ecodesign: Desenvolvimento de uma ferramenta criativa de apoio ao design de produtos sustentáveis*. 120f. *Dissertação (Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa)*, 2008.
- SOARES, A. B.; SILVA, R. M.; PEREIRA, F. R. et al. *Inovação em ecomateriais: superfícies autolimpantes inspiradas na biomimética*. Recife: Labdesign - Universidade Federal de Pernambuco, 2018.
- TAMKE, M.; FISCHER, A. (2020). Bio-inspired Design and Architectural Robotics. *Architectural Design*, 90(1): 112-119.
- TECLA Technology and Clay 3D Printed House / Mario Cucinella Architects. Disponível em: <https://www.archdaily.com/960714/tecla-technology-and-clay-3d-printed-house-mario-cucinella-architects>. Acessado em 24/06/24.
- YUDELSON, J. *Sustentabilidade e Inovação em Projetos Habitacionais*. Rio de Janeiro: Ed. Sustentar, 2018.