
RESUMO

As fibras de *Agave sisalana* são uma alternativa valiosa devido às suas propriedades mecânicas e baixos impactos ambientais. O uso de materiais naturais, como o Agave, na fabricação de pranchas de surfe sustentáveis está em ascensão. A pesquisa busca entender as estratégias biológicas de leveza e resistência do Agave, utilizando métodos de modelagem paramétrica e fabricação digital. A abordagem bioinspirada visa desenvolver algoritmos para gerar objetos leves e resistentes, incorporando estruturas bioinspiradas baseadas em diagramas de Voronoi. O estudo também inclui o uso de algoritmos evolutivos para selecionar padrões otimizados e verificar a integridade das estruturas. A investigação combina aspectos biológicos, computacionais e de fabricação para criar protótipos e modelos de estudo.

CONTEXTUALIZAÇÃO

O campo de estudo da biomimética é vasto e está alcançando proeminência particular através de uma explosão de novas descobertas em biologia e engenharia na busca de novas tecnologias desenvolvidas por meio da transferência de funções de sistemas biológicos (Lepora, *et al.*, 2013).

A biomimética busca emular a natureza para criar projetos sustentáveis. A natureza já encontrou soluções eficientes para problemas complexos, como energia e produção de alimentos. Os organismos utilizam recursos comuns, processados de forma sustentável, impulsionados pela energia solar. A biomimética inspira o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, que consomem menos energia, reduzem o uso de materiais e evitam substâncias tóxicas, criando um ambiente propício à vida (Baumeister, 2014; Benyus, 2013; Baumeister, 2014).

De acordo com Soares & e Arruda (2018), a abordagem da "Analogia" é essencial para os projetistas biomiméticos. Essa abordagem permite referenciar modelos naturais ao criar sistemas artificiais com características específicas. Os projetistas buscam compreender os princípios subjacentes dos sistemas naturais para aplicá-los no desenvolvimento de novos conhecimentos. Embora seja difícil copiar integralmente um modelo natural, a ênfase está em captar as essências e peculiaridades adaptadas aos sistemas artificiais análogos. A "Analogia" proporciona uma base sólida para o avanço do design biomimético, unindo a natureza à inovação tecnológica.

A aplicação das estratégias da natureza em conjunto com tecnologias de fabricação digital e manufatura aditiva tem relevância significativa para o campo do design. A pesquisa bioinspirada tem se concentrado em desenvolver métodos e ferramentas para o uso sistemático de informações provenientes de elementos naturais. Os cientistas estão utilizando a natureza como modelo para emular técnicas de solução encontradas na natureza, visando resolver problemas e desenvolver soluções inovadoras.

A biomimética desempenha um papel crucial na busca por soluções sustentáveis no design de materiais. No século XXI, as tecnologias avançadas ampliam as possibilidades na área, permitindo a

criação de novos materiais com propriedades aprimoradas. Barauna *et al.* (2016) destacam que o design de materiais, baseado na observação sistemática da natureza, adota o pensamento preditivo para desenvolver materiais avançados. Essa abordagem incorpora conhecimentos de design e gestão de processos, impulsionando a inovação de materiais para atender às demandas da sociedade.

O avanço das tecnologias de manufatura aditiva e o design de novos materiais para impressão 3D oferecem oportunidades para a inovação sustentável. No entanto, é importante considerar os impactos ambientais e na saúde humana ao escolher materiais. A seleção de materiais mais seguros durante o design e desenvolvimento de produtos promove o desempenho sustentável (Daya, 2017).

O design consciente do material está emergindo como uma abordagem que busca maximizar o desempenho com recursos mínimos, inspirado nas estratégias da natureza (Oxman, 2015). Essa abordagem utiliza tecnologias emergentes, como a fabricação digital, para programar as propriedades dos materiais e gerar formas e estruturas computacionalmente.

A abordagem de design chamada ecologia material, conforme descrita por Oxman (2010), busca estabelecer uma relação mais profunda entre o objeto de design e o ambiente, inspirada pela natureza. Essa abordagem reconhece a interação entre o ambiente e o objeto de design por meio de múltiplas dimensões e variáveis ambientais. Utilizando o design de estruturas bioinspiradas, materiais multifuncionais e fabricação digital, a ecologia material amplia o espaço de design, considerando a computação, a fabricação e o material como dimensões inseparáveis do processo. Isso resulta na criação de objetos ecológicos desde a concepção inicial.

Kapsali (2016) destaca que a biomimética valoriza os materiais na natureza, reconhecendo sua eficiência apesar das restrições de recursos. Proteínas e polissacarídeos são importantes polímeros biológicos, fornecendo uma variedade de propriedades e funções. A abordagem biomimética busca superar a limitação da diversidade de matérias-primas através por meio da hierarquia estrutural, em que a organização do material resulta em propriedades específicas. Essa compreensão é aplicada no design de materiais mais eficientes e sustentáveis, inspirados pela natureza.

Em vez de depender apenas das propriedades inerentes dos materiais para melhorar a resistência de um produto, é possível adotar abordagens bioinspiradas que otimizam o uso de materiais e energia. Isso significa que, ao revisar o design, podemos explorar alternativas que não necessariamente envolvem o uso de mais material, mas, sim, estratégias inspiradas na natureza.

Kapsali (2016) ressalta que a diversidade de polímeros utilizados na fabricação de produtos causa impactos negativos, como esgotamento de recursos e poluição. No entanto, a natureza nos ensina que é possível construir estruturas fortes com materiais aparentemente fracos. A abordagem hierárquica do design biomimético maximiza o uso de recursos e permite criar estruturas resistentes e complexas de forma sustentável.

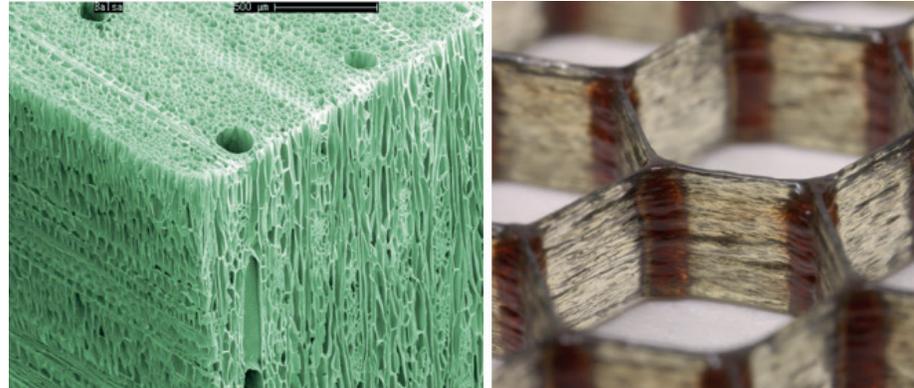
Baumeister (2014) destaca a distinção entre abordagens biomiméticas e soluções bioinspiradas, como a bio utilização. A biomimética busca aprender e emular estratégias naturais por meio de analogia, enquanto a bio utilização envolve a colheita de produtos ou produtores. Os biomímicos se inspiram em organismos para desenvolver processos, artefatos e materiais, buscando ideias e princípios em diferentes níveis, desde a estrutura física até o ecossistema.

Byrne *et al.* (2018) ainda destaca uma abordagem mais recente que é representada por inspirações em escalas muito pequenas, como a escala nanométrica; contudo, este esse tipo de bioinspiração está mais relacionado às características da superfície do material do que à estrutura interna do material deste.

Byrne *et al.* (2018) destacam que abordagens em escala micro têm sido bem-sucedidas ao estudar a relação entre a forma, composição e função da estrutura em materiais biológicos. Substituir o material biológico por um material artificial não compromete a função, uma vez que esta é principalmente determinada pelas características estruturais. No entanto, a combinação dessas perspectivas resulta em resultados mais alinhados aos princípios da biomimética.

A Figura 1 mostra micrografias eletrônicas de varredura da estrutura leve e resistente da madeira Balsa, bem como um estudo de design bioinspirado que emula essas propriedades em uma estrutura impressa em 3D. Utilizando uma combinação de resina epóxi e fibras de carbono, a estrutura busca manter o reforço estrutural sem

Figura 1: a) Micrografia eletrônica de varredura de madeira Balsa (*Ochroma lagopus*) 500 μm ; . b) Impressão 3D de compósitos celulares leves. Fonte: a) [http://sciencewise.anu.edu.au/articles/timbers\(2018\);](http://sciencewise.anu.edu.au/articles/timbers(2018);) . b) Compton & e Lewis (2014).



adicionar peso excessivo. Esse estudo exemplifica a transferência de função das estratégias de leveza e resistência da madeira Balsa para materiais impressos em 3D (Compton & Lewis, 2014).

O estudo de Araújo (2015) investigou a estrutura das paredes celulares do tecido vegetal do pendão floral da planta Agave para compreender suas estratégias de leveza e resistência. Foi observado que o Agave utiliza estratégias biológicas para alcançar essas características. Através do uso de técnicas de microscopia, foi possível analisar a organização estrutural das células lignocelulósicas presentes no tecido vegetal do Agave.

No estudo de Araújo (2015), foi desenvolvida uma estrutura biomimética inspirada nas paredes celulares lignocelulósicas do Agave, com o objetivo de emular suas estratégias biológicas em artefatos materializados. Utilizando processos de modelagem digital, design paramétrico e impressão 3D, foi possível alinhar o projeto aos princípios de crescimento e desenvolvimento de modelos biológicos. Essa abordagem permitiu a otimização do uso de matéria-prima e energia, mantendo propriedades mecânicas eficientes para as funções desejadas (Araújo, 2015).



Figura 2: Impressão 3D como exemplo de aplicação de uma estrutura bioinspirada nas estratégias de leveza e resistência do Agave. Estrutura que pode ser emulada em uma ampla gama de artefatos (Araújo, 2015).
Fonte: Araújo, (2015).

A tecnologia bioinspirada, que integra processos, princípios e recursos da natureza em sistemas técnicos, está ganhando destaque e é considerada de grande importância nos avanços científicos e tecnológicos a médio e longo prazos. Ela tem o potencial de transformar a manufatura atual e abrir novos mercados para indústrias envolvidas em tecnologias de fabricação e desenvolvimento de materiais.

O uso de materiais biológicos na tecnologia bioinspirada é valorizado por sua sustentabilidade. Sistemas biológicos feitos de materiais biológicos não causam desperdício ou danos irreversíveis ao ecossistema, ao contrário, enriquecem e sustentam o ambiente. Além disso, as estruturas biológicas oferecem propriedades diversificadas com um uso mínimo de materiais e energia, e geram produtos totalmente recicláveis. (Byrne *et al.*, 2018).

Os avanços na caracterização da função dos organismos biológicos e no desenvolvimento de técnicas avançadas de fabricação digital impulsionaram o crescimento da bioinspiração. Estima-se que a bioinspiração possa gerar bilhões de dólares em produção, economizando recursos e reduzindo a poluição até 2030. A fabricação digital bioinspirada é vista como uma nova fronteira da digitalização e da Indústria 4.0, com um forte potencial de mercado. A transformação biológica requer pesquisa e desenvolvimento extensivos. (Byrne *et al.*, 2018).

Esta pesquisa ressalta a importância de estudar o *Agave sisalana* sob a perspectiva da biomimética, pois ainda não foram encontrados estudos que abordem a emulação de suas estratégias naturais. Apesar de haver diversos estudos biológicos sobre a planta, a abordagem biomimética específica para o Agave ainda não foi explorada. Portanto, é crucial realizar estudos interdisciplinares para estabelecer bases teóricas e práticas que permitam extrair as funções e propriedades do Agave, por meio de analogias e emulações, com a colaboração de especialistas e profissionais.

Uma equipe multidisciplinar composta por biólogos, engenheiros, técnicos de laboratório, designers e programadores digitais conduziu esta pesquisa. Foram realizadas atividades de coleta de amostras e análises nos laboratórios de Anatomia Vegetal e microscopia eletrônica. Essas etapas seguiram rigorosos padrões científicos e foram orientadas pela Dra. Emília Arruda. A integração dos especialistas e as práticas laboratoriais contribuíram para a obtenção de dados qualitativos sobre as propriedades do *Agave sisalana*.

O laboratório de Biodesign e Artefatos Industriais da UFPE, coordenado pelo professor designer Amilton Arruda, também integrou a equipe de pesquisa. O laboratório desempenhou um papel importante ao fornecer orientações e apoio nas etapas de projeto, bem como na análise do modelo natural para a extração de analogias e na transferência de funções para a criação de artefatos bioinspirados.

A pesquisa contou com o apoio dos laboratórios de engenharia mecânica e impressão 3D coordenados pelo professor engenheiro PhD Jorge Lino Alves, que também atuou como coordenador do estudo. Os laboratórios envolvidos foram o Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços e o Laboratório de Impressão 3D da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), além do Laboratório de Impressão 3D do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI) – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial. Esses laboratórios desempenharam um papel importante no desenvolvimento de materiais compósitos bioinspirados com fibras de Agave, assim como na execução de ensaios mecânicos para avaliar o comportamento dos materiais. A realização de um intercâmbio de mobilidade internacional de pesquisa de

doutorado na FEUP permitiu o acesso aos equipamentos necessários para as atividades de bancada e validação dos materiais.

A pesquisa contou com a colaboração de FabLabs, empresas de impressão 3D, e, suporte técnico de um arquiteto e designer paramétrico, e o laboratório de fabricação digital Selvagen. Essas colaborações foram cruciais para o desenvolvimento de estratégias computacionais, criação de códigos algorítmicos e utilização de tecnologias de usinagem para aplicar as estratégias bioinspiradas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Através de métodos de analogia e transferência de função, as estratégias biológicas são emuladas em princípios de design auxiliado por processos de modelagem paramétrica. Em particular, esta proposta visa o desenvolvimento de algoritmos para gerar objetos leves e resistentes com seus núcleos internos obtidos por um design baseado em diagramas de Voronoi, por meio do uso de estratégias computacionais para criação de estruturas bioinspiradas em um conceito genérico de leveza e resistência.

Também foram desenvolvidos mais dois códigos com a mesma abordagem e aplicação no desenvolvimento de pranchas de surfe e quilhas, onde em que foi incluído um algoritmo evolutivo para seleção de opções de padrões otimizados e outro parâmetro de verificação de integridade das estruturas dos artefatos. Deste modo, trabalhou-se a bioinspiração na leveza e resistência do Agave com investigação biológica, processos de modelagem paramétrica e fabricação digital para geração de protótipos e modelos de estudo.

A pesquisa e a aplicação da biomimética são eficazes para a inovação bioinspirada, seguindo os modelos da natureza. No caso do Agave, foi realizado um estudo da biologia e da anatomia vegetal para compreender as estratégias de leveza e resistência presentes no escapo floral da planta. A investigação em escala micro da estrutura celular do Agave forneceu informações valiosas para a concepção de estruturas leves e resistentes, com baixo consumo de matéria e energia. Esses conhecimentos podem ser aplicados no desenvolvimento de novas tecnologias e produtos inspirados na natureza.

A escolha do Agave como elemento natural e fonte de inspiração está alinhada aos princípios da biomimética e da sustentabilidade. No entanto, foi necessário realizar uma pesquisa sobre anatomia vegetal e conduzir experimentos em laboratório utilizando métodos de microscopia para obter imagens de alta resolução e avaliar a estrutura celular do escapo floral do Agave. Essa fase de desenvolvimento da pesquisa permitirá uma análise mais detalhada e aprofundada dessa estrutura.

BIOMIMÉTICA

Segundo Queiroz, Rattes e Barbosa *et al.* (2015), a partir da década de 1950, surgiram os termos "biônica" e "biomimética" para descrever a aplicação da inspiração na natureza em atividades humanas investigativas e projetuais. A natureza tem sido reconhecida como uma valiosa fonte de soluções, impulsionando o desenvolvimento da bioinspiração e possibilitando melhorias no desempenho de artefatos concebidos pelo homem.

Na década de 1960, os termos "biologia" e "tecnologia" se uniram para formar o campo da biomimética, com a influência da cibernética. Essa combinação resultou no termo "biônico" e estabeleceu uma base comum para a transferência de conhecimento. A norma ISO 18458-2015 define a transferência de conhecimento como elemento central da biomimética.

Segundo Soares e Arruda (2017), o engenheiro Otto Schmitt definiu o termo "Biomiméticabiomimética" em 1969, relacionado a biomateriais. Ele descreveu como o estudo da formação, da estrutura e da função de substâncias e materiais biologicamente produzidos, bem como dos mecanismos e processos biológicos, com o objetivo de sintetizar produtos similares por meio de mecanismos artificiais que imitam os naturais.

Werner Nachtigall, um zoólogo alemão, desempenhou um papel importante na criação dos princípios da Biônicabiônica. A partir da década de 1970, sua influência tornou a Biônica biônica uma disciplina relevante para engenheiros e tecnólogos. Nachtigall também contribuiu para a expansão da Biomimética biomimética para a microescala

e a nanoescala. Seu trabalho concentrou-se na biologia, na biomecânica de voo e na biônica em geral. Embora a Biônica biônica tenha sido associada principalmente ao estudo de mecanismos animais e à criação de partes artificiais do corpo humano, seu impacto se estende para diversos campos (Chen, 2019; Whall, 2006; Chen, 2019).

A partir da década de 1990, a biomimética experimentou um crescimento significativo, impulsionado pelo avanço tecnológico em campos como ciência da computação, nanotecnologia, mecatrônica e biotecnologia. Esses desenvolvimentos permitiram a transferência de sistemas biológicos complexos para aplicações tecnológicas (ISO 18458-2015).

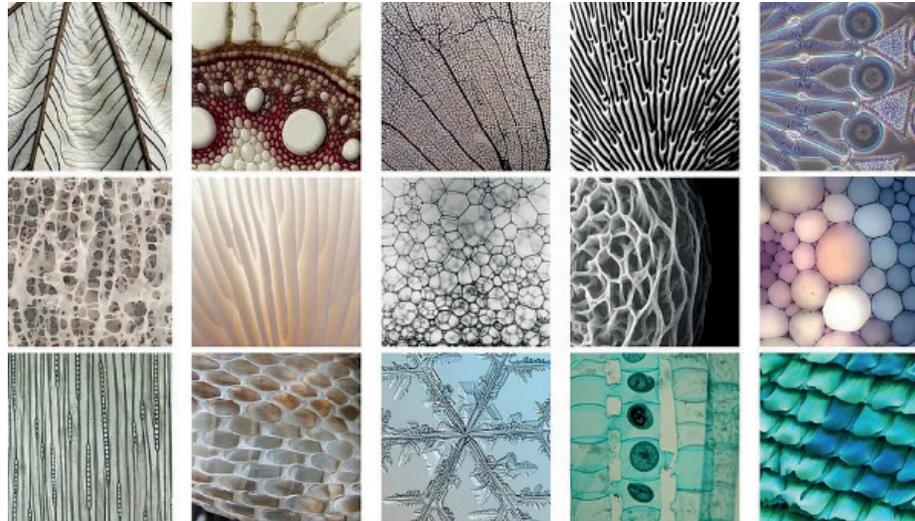
A biônica, associada à robótica, tem ganhado popularidade como abordagem de design, mencionada por Victor Papanek e Bruno Munari. Outros termos como biomimetismo, bioinspiração e bio-design também surgiram, mas a biomimética é o mais difundido atualmente. Reconhecida como disciplina científica, a biomimética impulsionou inovações em produtos e tecnologias, adotando uma abordagem sistêmica baseada em princípios observados em sistemas biológicos. (ISO 18458-2015; Whall, 2006; Queiroz; Rattes; Barbosa. 2015; Queiroz *et al.*, 2015; ISO 18458-2015; Whall, 2006).

Perante esta perspectiva, vários pesquisadores, designers e projetistas estão adotando a biomimética como uma abordagem para o design sustentável, buscando princípios e soluções na natureza. A biomimética se baseia na eficiência dos sistemas biológicos que sobreviveram ao longo do tempo, adaptando-se ao ambiente de forma surpreendente. Os designers podem utilizar esses princípios para criar produtos e materiais mais inteligentes, inovadores e com menor impacto ambiental.

BIOINSPIRAÇÃO E RELAÇÃO ESTRUTURA-FUNÇÃO

De acordo com Hsuan-Na (2018), a criação de objetos e produtos, mesmo os altamente tecnológicos, é amplamente baseada nos princípios e formas encontrados na natureza. Muitos produtos bem-sucedidos são resultado de uma relação eficaz com as formas naturais e os fenômenos presentes nelas.

Figura 3: Biblioteca de estruturas naturais *open source*. Inspiração em estratégias da natureza. Muitas estruturas da natureza podem atender a indústria com a aplicação de soluções naturais para realizar inovações sustentáveis. Fonte: <https://www.lilianvandaal.com/single-post/2017/11/06/structure-library> (2022).



As relações estrutura-função são um ponto de convergência entre Engenharia e Biologia, proporcionando uma base para a colaboração entre as duas disciplinas (Cohen & Reich, 2016). A análise da morfologia da natureza permite a percepção de detalhes e estratégias funcionais presentes em sua estrutura, levando a ideias inovadoras e ganhos de eficiência (Soares; Arruda, 2018; Wilson *et al.*, 2010; Soares & Arruda, 2018). De acordo com Gleich *et al.* (2002), o princípio de forma e função é uma das vertentes mais antigas do desenvolvimento de artefatos inspirados na natureza, e envolve a relação entre formas ou estruturas biológicas e suas funções. Essa abordagem remonta a observações pré-científicas da natureza que frequentemente inspiraram soluções técnicas.

De acordo com Cohen & Reich (2016), a biomimética utiliza estruturas e padrões da natureza como fonte de inspiração para soluções de design. Comparadas às funções, as estruturas são menos subjetivas e menos dependentes de terminologias específicas. Os padrões de estrutura-função são uma ponte entre os campos da biologia e da tecnologia, impulsionando a inovação em ciência, engenharia e design.

De acordo com Johnson *et al.* (2009), a abordagem biomimética não se limita a copiar designs da natureza, mas busca extrair princípios e bons projetos para agregar valor e funcionalidade aos projetos mecânicos humanos. O objetivo é utilizar soluções eficientes e

adaptáveis encontradas na natureza, adaptando-as para atender às necessidades humanas.

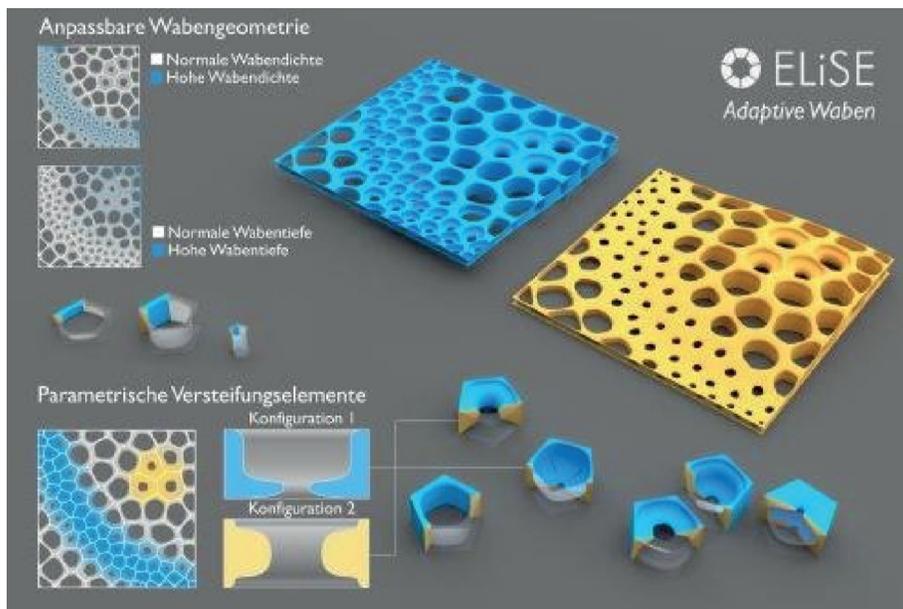


Figura 4: A empresa ELiSE desenvolveu uma estrutura paramétrica bioinspirada onde em que o enrijecimento automático de invólucros e volumes tem relação direta com o tamanho e a geometria de cada célula e são adaptados de acordo com a carga – por exemplo, células menores e mais fechadas, onde a carga é maior, transformando-se em células maiores e mais abertas, onde o carregamento é mínimo. Fonte: David Leidenfrost, ELiSE (2015).

O desenvolvimento da fabricação digital e a integração de estratégias bioinspiradas no processo de design tornam o design biomimético uma opção promissora para estruturas leves e eficientes. Essa abordagem, que combina modelagem paramétrica e insights da natureza, tem o potencial de gerar soluções sustentáveis e eficientes.

A conexão entre design e fabricação é essencial para a arquitetura e o design industrial. Antes da revolução digital, os designers dividiam os projetos em partes individuais e estudavam estratégias de montagem limitadas a estruturas ortogonais. Com a revolução digital, a integração direta do design à fabricação superou essas limitações, permitindo lidar com formas complexas (Tedeschi, 2014).

As impressoras 3D são mais eficientes e produzem menos desperdício em comparação com os métodos de fabricação subtrativos. Elas são ideais para a fabricação de baixo volume, peças complexas e personalizadas. No entanto, é importante escolher o método de impressão, as propriedades do material e o acabamento da superfície de acordo com as necessidades do projeto (Damodaram, 2018).

Através destes desses processos podem ser impressas formas

complexas sólidas ou ocas. Os materiais de impressão podem ser biodegradáveis, como por exemplo o poliácido láctico (PLA (poliácido láctico)), assim como, outros filamentos de materiais compósitos compostos por fibras naturais e PLA, e muitos outros.

O uso da fabricação digital no contexto da biomimética tem sido uma abordagem inovadora para traduzir os princípios da natureza em projetos e produtos tangíveis. Tecnologias avançadas, como impressão 3D e fabricação digital, permitem explorar a complexidade e a eficiência dos padrões biomiméticos, criando estruturas e componentes inspirados na natureza. A aplicação do design paramétrico, combinado com a fabricação digital, oferece flexibilidade na produção e possibilita a criação de produtos personalizados e adaptáveis. Essa combinação impulsiona a criatividade e a inovação, resultando em soluções mais eficientes, sustentáveis e inspiradas pela natureza.

O diagrama de Voronoi é uma representação gráfica matemática bioinspirada que consiste em células criadas a partir das arestas e nós do diagrama, onde cada célula é formada pelos pontos equidistantes de pelo menos três centros. Essas células delimitam as áreas de Voronoi para cada centro, que são compostas por segmentos e meias-linhas. Essa representação permite visualizar os pontos mais próximos de um determinado centro em um plano (Novak, 2015).

Os diagramas de Voronoi são utilizados para criar formas espaciais e estruturais a partir de distribuições contínuas de unidades celulares. Essa abordagem permite a criação de objetos com design inspirado na natureza, aplicando sistemas de auto-organização de estruturas biológicas. Algoritmos baseados em Voronoi simulam processos naturais e são cada vez mais utilizados no campo do design para modelar esses princípios e criar estruturas 3D criativas e flexíveis.

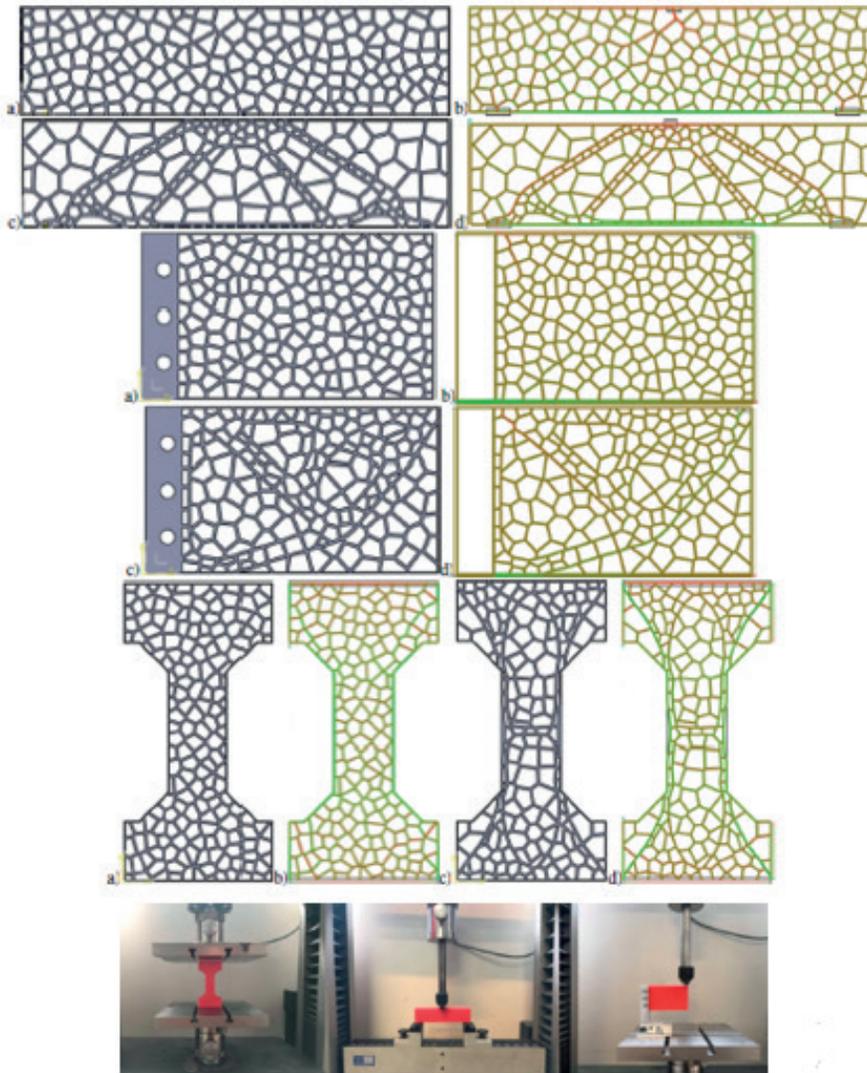


Figura 5: (a) Modelos de comparação apresentando as seções transversais com células de Voronoi distribuídas aleatoriamente. (b) e (d) Visualização da relação entre a tensão axial nos elementos da viga e a tensão de escoamento do material. (c) Distribuições otimizadas de células de Voronoi. Abaixo A seguir, modelos de testes: viga de compressão, viga simplesmente apoiada e viga cantilever. Fonte: Adaptado adaptada de Öncel, A. & e Yamam, U. (2019).

A pesquisa sobre as fibras de Agave revela seu potencial para serem utilizadas na fabricação digital ou em processos manufaturados, especialmente na criação de materiais bioinspirados. Essas fibras apresentam propriedades que permitem a produção de biocompósitos, que podem ser usados na impressão 3D, oferecendo benefícios como leveza, sustentabilidade, biodegradabilidade e baixo custo (Velarde *et al.*, 2021).

O AGAVE

O Brasil é o maior produtor mundial de Agave, também conhecido como Sisalsisal, representando cerca de 70% do mercado global de fibras duras. A espécie mais comum na região Nordeste do Brasil é a *Agave sisalana*, que é cultivada principalmente para a extração de fibras duras utilizadas na indústria. De acordo com a Conab, em setembro de 2018, dados indicam que a produção de sisal atingiu aproximadamente 92 mil toneladas em 2015 e cerca de 88 mil toneladas em 2016 (Conab, 2018).

O Agave ou Sisal (*Agave sisalana Perrine*) é uma planta exótica e invasora presente nas dunas e restingas do litoral brasileiro. Segundo Ulysséa & e Silvestro (2010), essa espécie introduzida é dominante e prejudica o crescimento da flora nativa, além de não fornecer alimento para a fauna local.

O Agave apresenta um ciclo de vida que varia de 7 sete a 10 dez anos. A reprodução ocorre no escapo floral, onde surgem pequenas folhas ao redor do ápice do pendão durante a inflorescência. O caule se transforma em um pedúnculo floral, alcançando uma altura de seis a oito metros. A planta produz ramos e flores, sendo uma espécie monocárpica que floresce uma única vez antes de morrer. (ISSG, 2020; Silva *et al.*, 2008; ISSG, 2020).

Apesar de ser uma espécie invasora, o agave ou sisal tem sido benéfico no Nordeste, adaptando-se em áreas onde outras plantas têm dificuldade. Além de contribuir para o meio ambiente, oferece oportunidades econômicas através por meio do cultivo e do uso das fibras das folhas, gerando renda e emprego para as comunidades locais.

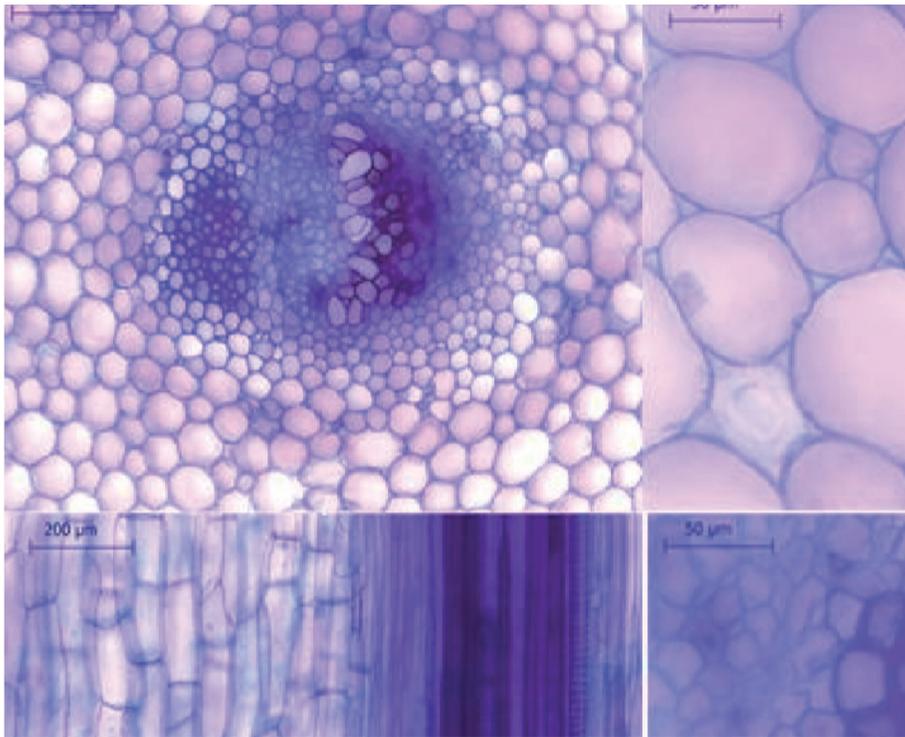
O pendão floral do Agave, que geralmente é pouco aproveitado, pode ser utilizado na fabricação de blocos para pranchas de surfe. Pesquisas conduzidas por Ulysséa & e Silvestro (2010) mostraram que o Agave possui qualidades favoráveis para esse fim, como leveza, resistência e requisitos ambientais. A produção de blocos a partir do Agave tem sido bem-sucedida, e as pranchas de surfe fabricadas com esse material são bem aceitas em termos de usabilidade.

Através do Agave, objeto de estudo desta investigação, busca-se entender por que esse sistema natural é leve e resistente, quais as

estratégias biológicas de leveza e resistência da estrutura das suas paredes celulares. Acredita-se que uma abordagem bioinspirada é aquela que favorece a pesquisa de desempenho ecológico e métricas sobre a criação de formas e materiais bioinspirados.

A Figura 7 mostra cortes transversais e longitudinais do Agave, revelando diferentes elementos do tecido vegetal. O xilema é composto por fibras e traqueídes, células alongadas com parede secundária, organizadas em filas verticais sobrepostas. Essas células desempenham um papel importante na sustentação da planta, conferindo rigidez e flexibilidade. Além disso, o parênquima também está presente, consistindo em células parenquimáticas com diferentes formas e espessuras. Essas estruturas são essenciais para o funcionamento e o desenvolvimento adequados do Agave.

Figura 7: Cortes transversais e longitudinal do tecido parenquimático do Agave apresentando diferentes geometrias. Fonte: Araújo (2015).



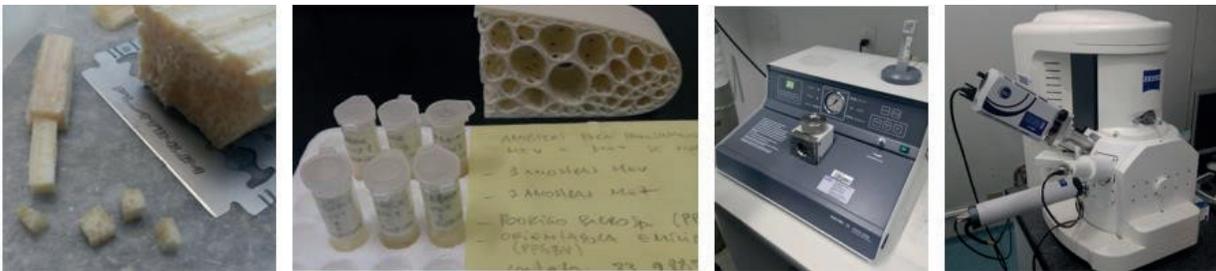
A estrutura celular do Agave, quando seco, é composta por paredes celulares vazias, o que contribui para sua leveza. As imagens microscópicas mostram uma menor proporção de tecidos lignificados, com células espessadas encontradas apenas no periciclo e no xilema

Figura 8: Preparação das amostras para MEV e alguns equipamento utilizados (ponto crítico e MEV Zeiss EVO).
Fonte: Araújo (2019).

primário, como fibras, traqueídes e elementos de vaso. Essas características são responsáveis pela rigidez e flexibilidade da planta, ao mesmo tempo em que contribuem para sua leveza (Araújo, 2015).

Na perspectiva do design, o Agave é eficiente em termos de matéria e energia. A deposição de lignina ocorre apenas onde é necessário, garantindo a leveza e a resistência adequadas com economia de matéria e energia. As pontuações, que são áreas vazadas na estrutura da parede celular, também contribuem para a economia de matéria, pois não comprometem a resistência da estrutura e aumentam a leveza do material (Araújo, 2015).

As imagens (que compõem a Figura 8) serviram de inspiração para extrair as estratégias de Agave e, posteriormente, realizar a fase de emulação auxiliada por processos de design paramétrico. As imagens ilustram etapas do processo de preparação de amostras para extração de dados e são aplicadas no desenvolvimento da pesquisa.



Nesta etapa, analisa-se a função dos padrões Voronoi na estrutura celular do Agave, identificando a relação entre esses padrões e a estratégia de leveza e resistência. As células com paredes espessas conferem rigidez e resistência, enquanto as células com paredes finas proporcionam leveza e flexibilidade. Essa combinação de células distintas busca atender aos requisitos de projeto, resultando em uma estrutura que equilibra resistência e leveza.

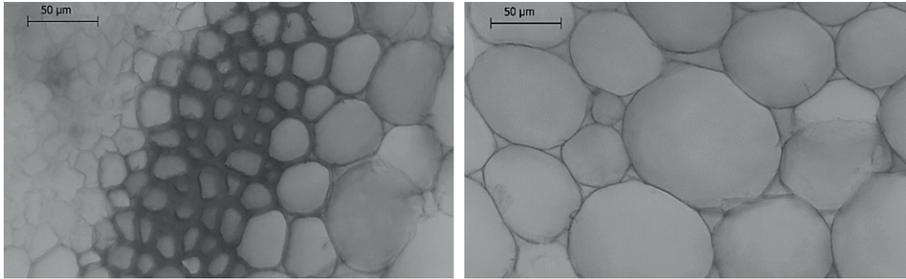


Figura 9: Distribuição variada (à esquerda) e uniforme (à direita). Fonte: Araújo (2019).

Figura 10: Distribuição variada. Fonte: Araújo (2019).

A análise visual das imagens permitiu identificar duas formas principais de distribuição dos padrões de arranjos celulares: distribuição uniforme e distribuição variada. Na Figura 9 é apresentada a distribuição dos padrões, incluindo arranjos celulares uniformes e variados. Nessa análise, foram identificadas duas abordagens principais relacionadas às funções de leveza e resistência, com base na anatomia vegetal.

As células parenquimáticas proporcionam leveza e flexibilidade à estrutura, enquanto as fibras do xilema conferem resistência e rigidez. A análise visual revelou a presença dessas características, com as células parenquimáticas associadas à leveza e as fibras do xilema associadas à resistência.

A simulação da distribuição variada/combinada de células revela a importância de combinar células de diferentes tamanhos e espessuras de parede para obter propriedades específicas, como leveza e resistência, em diferentes partes da estrutura. A variação na densidade e na concentração de células, juntamente com a variação na espessura das paredes celulares, contribui para alcançar propriedades mecânicas desejadas.

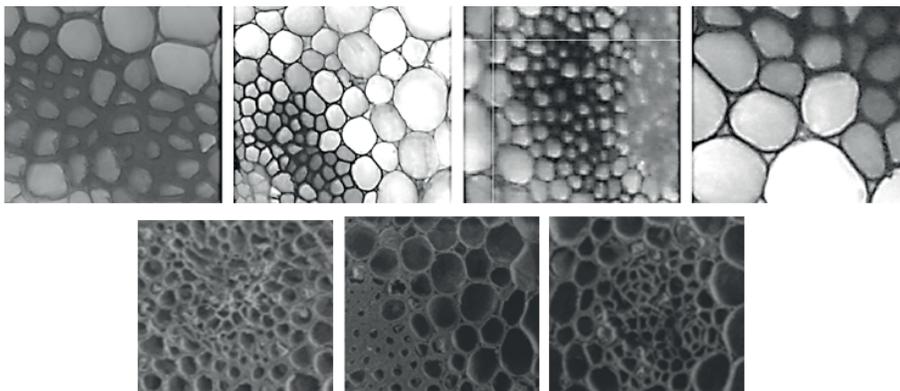


Figura 11: Modelos genéricos representativos dos dois métodos de distribuição, uniforme e variada; e micrografias de Agave referentes aos dois princípios de padrões de distribuição de células com arranjos uniformes e variados, os quais representam o conceito de leveza e resistência. Fonte: Araújo (2021).

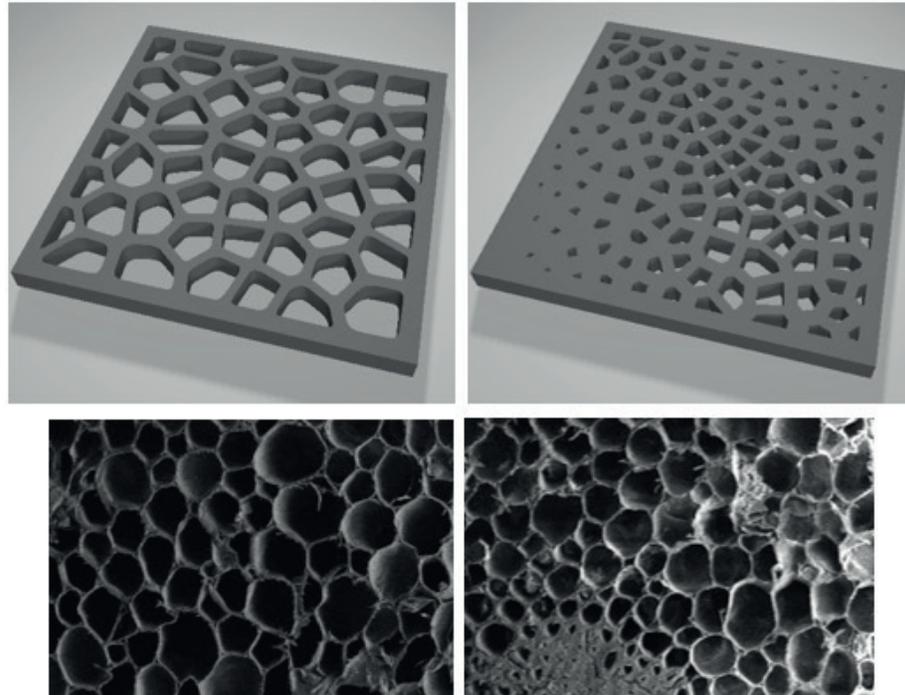
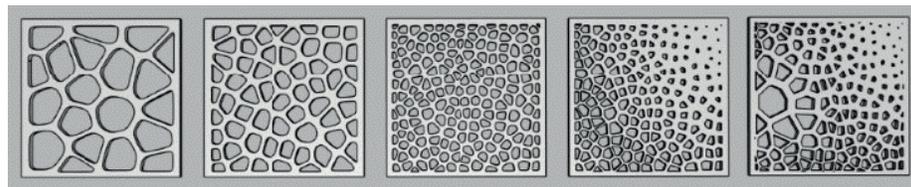


Figura 12: Estruturas paramétricas como alternativas de emulação dos padrões e gerando inúmeras possibilidades estéticas e estruturais. Fonte: Araújo (2021).

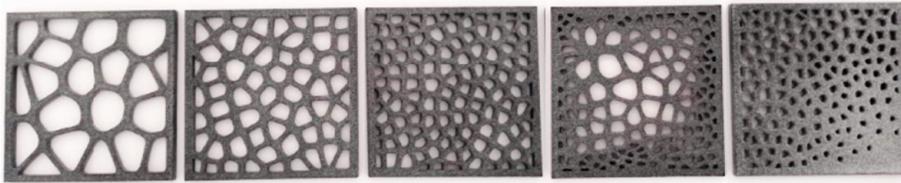
Foram selecionados os resultados mais relevantes da emulação da estratégia de leveza e resistência do Agave, que incluem duas abordagens de arranjos celulares: distribuição uniforme e distribuição variada por atratores. Foram desenvolvidos três modelos com variação de densidade na distribuição uniforme e exploradas duas possibilidades de variação de densidade na distribuição variada por atratores, considerando o diâmetro das células e a espessura das paredes. Esses resultados representam avanços significativos na busca por estruturas bioinspiradas que combinem leveza e resistência.



Foram definidas cinco variações de padrões de organização celular para a prototipação tridimensional. Os dados relevantes, como área de superfície, volume, espessura das paredes e peso, foram extraídos do código para análise comparativa das placas impressas. Essas

informações são essenciais para avaliar o desempenho e a eficiência das estruturas prototipadas.

A análise dos dados das impressões dos modelos reforçou a importância da investigação das estratégias de leveza e resistência do Agave. A revisão da literatura e as reflexões sobre a estrutura celular confirmaram a aplicabilidade dessas estratégias no design bioinspirado. Essas descobertas ressaltam a relevância de explorar as aplicações dessas estratégias na concepção de estruturas eficientes e sustentáveis.



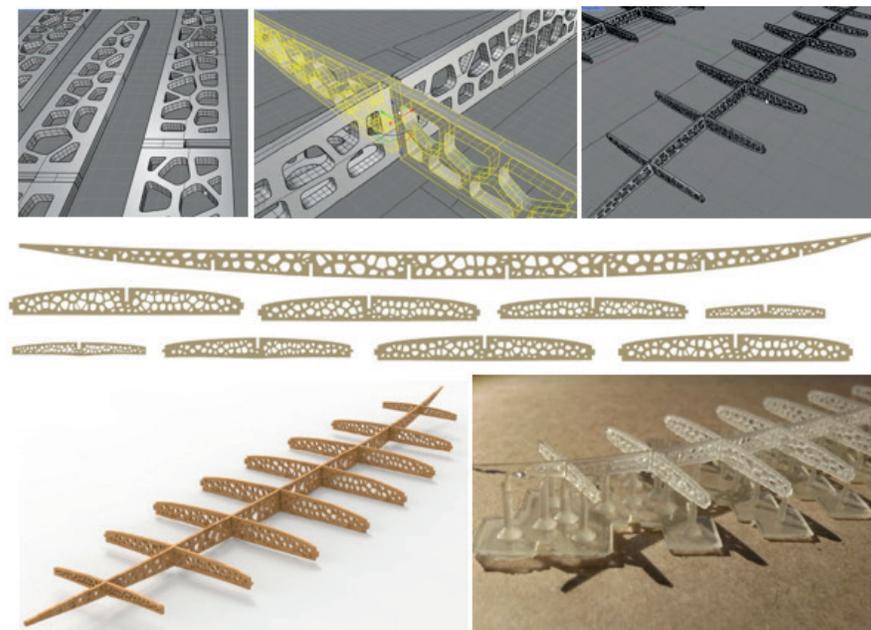
Os modelos 01, 02 e 03 foram comparados em relação ao padrão de distribuição uniforme. O modelo 01 é mais leve, flexível e possui menor volume de material. O modelo 02 possui densidade intermediária, enquanto o modelo 03 é mais denso, resultando em maior resistência e rigidez. Essas características foram observadas através de análises táteis e sensoriais. Os modelos 04 e 05 foram analisados em relação ao padrão de distribuição variada. O modelo 04 possui alta densidade de células com paredes espessas, resultando em maior volume, peso, rigidez e resistência. Já o modelo 05 apresenta menor densidade no centro, mas com paredes espessas, resultando em menor peso e volume. O modelo 05 busca um equilíbrio entre resistência e leveza, reforçando a estrutura sem aumentar demasiadamente o peso e o volume. Um modelo impresso em maior escala foi criado usando filamento de PLA por FFF. Essa peça permitiu explorar diferentes processos e materiais, além de observar acabamentos distintos. Sua finalidade foi comparar e analisar em relação aos modelos anteriores, ampliando as possibilidades de estudo e experimentação.

Figura 13: Modelo de impressão 3D (SLS) com dimensões 60 x 60 x 03 mm. Fonte: Araújo (2021).

Figura 14: Modelo de impressão 3D (FE) com dimensões 150 x 150 x 10 mm. Fonte: Araújo (2021).



Figura 15: Outputs do esqueleto interno de uma prancha de surfe oca. Fonte: Araújo (2021).



Durante o projeto, foram feitos protótipos de quilhas em escala real usando fabricação digital, como resultados gerados pelo algoritmo. A Figura 16 exibe uma variedade de quilhas gerados geradas pelo código. Essas etapas de prototipagem e geração de *outputs* contribuíram para a melhoria do código, design e funcionalidade do artefato.

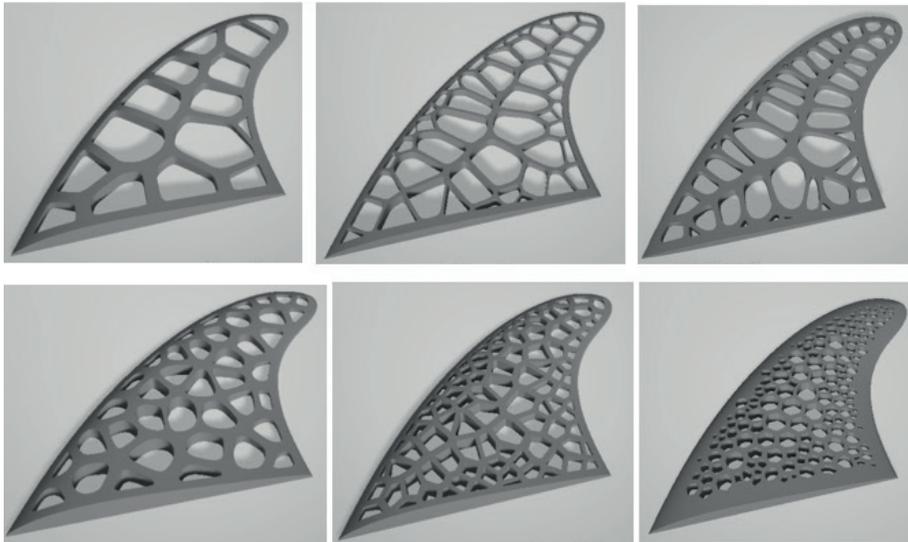


Figura 16: Variedade genética dos modelos selecionados.

Fonte: Araújo (2022).

Foi utilizada uma metodologia de análise e otimização para escolher os modelos mais adequados, buscando um equilíbrio entre leveza e resistência. A proposta não era obter a configuração mais resistente ou mais leve, mas sim criar variações que permitissem balancear essas características. Um algoritmo generativo foi desenvolvido para gerar múltiplas opções de design de artefatos digitais bioinspirados, proporcionando uma ampla gama de possibilidades.

Foi desenvolvido um protótipo de quilha para pranchas de surfe utilizando estratégias de leveza e resistência inspiradas no Agave. O protótipo foi impresso em uma impressora 3D de resina com material de base biológica de soja, explorando as propriedades estruturais e materiais do Agave. Essa abordagem visa criar uma quilha leve, resistente e com capacidade de flutuação, proporcionando melhor desempenho nas pranchas de surfe.

A quilha impressa funciona como o núcleo interno da estrutura e é preenchida com o material bioinspirado Respan contendo 20% de fibras de 600 μm . Após o preenchimento, é realizado o processo de nivelamento e laminação com fibra de vidro e resina elastômera 3002 para aumentar a resistência mecânica e tornar a quilha impermeável. A aplicação da quilha bioinspirada na prancha de surfe é uma integração criativa dos conceitos abordados na pesquisa. Devido à presença de ar na espuma, a quilha flutua quando impermeabilizada, evitando que afunde caso se solte da prancha. Além

Figura 17: Etapas de desenvolvimento de um protótipo de quilha bioinspirada em estruturas celulares com padrão aplicação do padrão de Voronoi com base nas estratégias de leveza e resistência do Agave, e aplicação de material bioinspirado com fibras de agave e resinas de mamona. Fonte: Araújo (2022).

disso, essa aplicação possui um apelo estético atraente, explorando as dimensões sensoriais e bioinspiradas nos artefatos de surfe.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A incorporação das estratégias de modelos naturais na fabricação digital e manufatura oferece um potencial inovador em sustentabilidade. A aplicação dessas estratégias permite criar artefatos sustentáveis, aproveitando as informações da anatomia celular do Agave para conceber estruturas leves e resistentes com o uso de materiais sustentáveis. A escolha do Agave como fonte de bioinspiração estrutural e material para artefatos de surfe está alinhada aos princípios da biomimética e da sustentabilidade.

A partir do estudo do Agave, foi possível compreender as estratégias biológicas de leveza e resistência presentes em suas paredes celulares. Isso destacou a importância de projetar estruturas biomiméticas com base nos arranjos celulares de estruturas biológicas, levando em consideração a anatomia vegetal e os tipos de células presentes. Esse conhecimento embasado no estudo do Agave contribui para o desenvolvimento de estruturas mais leves e resistentes.

O estudo permitiu explorar de forma bioinspirada a manipulação de estruturas paramétricas de padrões de Voronoi, que foram utilizados como ferramenta para emular os princípios de leveza e resistência do Agave. Foram desenvolvidos três códigos para emulação genérica, desenvolvimento de esqueletos para pranchas de surfe e geração de quilhas. A descrição detalhada dessa fase demonstra como foram programadas as estratégias de computação paramétrica baseadas na bioinspiração, visando alcançar os objetivos estabelecidos. Esses códigos permitem gerar infinitas variações de *outputs* com base nos parâmetros desejados.

Diversos processos de impressão 3D foram abordados no estudo, com o SLA sendo escolhido para a impressão das quilhas devido às suas vantagens em termos de dimensões, qualidade de acabamento e possibilidades estéticas. Já para a prototipagem do esqueleto das pranchas de construção oca, optou-se pelo método de usinagem por CNC, amplamente utilizado na fabricação de pranchas de surfe de madeira. A aplicação da estratégia do Agave nessa estrutura permitiu otimizar a leveza e a resistência do esqueleto, explorando a construção oca de forma vazada.

Os artefatos foram validados por meio da otimização com algoritmos de inteligência artificial e testes mecânicos, demonstrando comportamento similar ao das amostras de Agave. Os materiais compostos por fibras de Agave em matrizes de resina de mamona foram aplicados nas pranchas e quilhas de surfe, contribuindo para o desempenho técnico e ambiental dos artefatos.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, R. (2015). *Biomimética e artefatos para ambientes aquáticos* –: estratégias de leveza e resistência inspiradas na estrutura celular do Agave. Beau Bassin: Ed. Novas Edições Acadêmicas, Omni Scriptum Publishing Group – Beau Bassin., 2015.

BAUMEISTER, D. (2014). *Biomimicry Resource Handbook: A seed of Best Practices*. Missoula, Montana: Ed. Biomimicry 3.8 – Missoula, Montana.(, 2014).

BENYUS, J. (2003) *Biomimética: Inovação inovação inspirada pela natureza*. Ed.São Paulo: Pensamento-Cultrix., 2003.

BYRNE, G. *et al.* ; DIMITROV, D.; MONOSTORI, L.; TETI, R.; HOUTEN, F.; WERTHEIM, R. (2018). Biologicalisation: Biological Transformation in Manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*,. [S. l.], Volume v. 21, p. 1-32, May maio 2018, Pages 1-32. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.03.003>.

COHEN, Y. & REICH, Y. (2016). *Biomimetic Design Method for Innovation and Sustainability*. Switzerland: Springer International Publishing, 2016 – doi: 10.1007/978-3-319-33997-9 - Switzerland.

COMPTON, B. G., ; LEWIS, J. A.: 3D-printing of lightweight cellular composites. *Adv. Mater.*, [S. l.], v. 26, p. 5930--5935, (2014).

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. *Conjuntura Mensal*. 2018. Acesso em: 11/2018 Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-fibras/item/download/22582_c625a2e446783a366275711d8d78f08d. Acesso em: nov. 2018.

DAMODARAM, R. *Bio-Mimetic Design With 3d Printable Composites*. South Dakota State University: Thesis Master of Science. South Dakota State University,. 2018.

DAYA, T. *Facilitating Sustainable Material Decisions: A Case Study of 3D Printing Materials*. 2017. Thesis (PhD). thesis. – UC Berkeley Electronic Theses and Dissertations. , 2017.

- GLEICH, A. *et al*; PADE, C.; PETSCHOW, U.; PISSARSKOI, E. *Potentials and Trends in Biomimetics*. New York: Springer. , New York. 2002.
- GLOBAL Invasive Species Database. *Species profile: Agave sisalana*, 08 jun. 2010. Disponível em: <http://www.iucngisd.org/gisd/speciesname/Agave+sisalana>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- HSUAN-NA, T. *Design: conceitos e métodos*. Ed. São Paulo: Blucher. , São Paulo, 2018.
- ISSG – GLOBAL Invasive Species Database. *Species profile: Agave sisalana*. <http://www.iucngisd.org/gisd/speciesname/Agave+sisalana>. Acessado em 20/04/2020.
- ISO (18458-2015). *Biomimetics –: Terminology, concepts and methodology*. 2015.
- ISO 527-1. *Plastics –: Determination of tensile properties – Part 1: General principles*. 2019.
- JOHNSON, *et al*. Recent advances in biomimetic sensing technologies. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, [S. l.], v. 367, n. (1893), p. 1559--1569, ano. doi:10.1098/rsta.2009.0005. 2009
- KAPSALI, V. *Biomimetics for Designers –: Applying Nature's Processes & Materials in the Real World*. Londres: Ed. Hames & Hudson, London, 2016.
- LEPORA, N. F; VERSCHURE, P.; PRESCOTT, T. J. The state of the art in biomimetics. *Bioinspiration & Biomimetics*, [S. l.], v. 8, (n. 1), 013001–. doi:10.1088/1748-3182/8/1/013001. 2013.
- MUNARI, Bruno. *Das coisas nascem as coisas*. São Paulo,: Martins Editora. , 1981.
- OXMAN, N. *Material-based design computation*. 2010. Thesis (Ph.D.)- – Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture, 2010.
- OXMAN, N. *et al*; ORTIZ, C.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. Computer-Aided Design. *Elsevier*, [S. l.], Volume v. 60. , p. xx-xx, 2015.
- QUEIROZ, NatáliaN.,; RATTES, Rafael R.;& BARBOSA, Rodrigo. *Biônica*

e biomimética no contexto da complexidade e sustentabilidade em projeto. In: ARRUDA, A. J. V. (org.). *Design Contextocontexto: ensaios sobre design, cultura e tecnologia – Design & Complexidade*. Org. Amilton Jose Vieira de Arruda. Recife: Vol. 1. Ed. Universitária, 2015. v. 1, Cap.7. p. 127-144. Ed. Universitária: Recife – PE, 2015.

SILVA, R. V. *Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais*. 2003. Tese (dDoutorado.) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SOARES, T., & ARRUDA, A. J. Ecomateriais biomiméticos, um caminho eficiente para a sustentabilidade. *MIX Sustentável*, Florianópolis, v. 3, n.(4), p. 29-45, 2017. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2017.v3.n4.29-45>. 2017.

SOARES & ARRUDA (2018). Novas estratégias da biomimética: as analogias no biodesign e na bioarquitetura. *MIX Sustentável*. , Florianópolis. , v. 4, – n. 1 –, p. 73-82 –, mar.ço. 2018.

TEDESCHI, A. (2014). *AAD Algorithms-Aided Design.: Parametric strategies using grasshopper*. Local: edEd. Le Penseur., (2014).

ULYSSEÁ, M.,; SILVESTRO, M.: Pranchas de Surf Ambientalmente Corretas, Utilizando Madeira da Agave, Espécie Exótica e Invasora de Vegetação Nativa Brasileira. In: 1º 1º CONGRESSO DE INOVAÇÃO, TECNOLOGIA E SUSTENTABILIDADE, 2010, – Santa Catarina, (2010). *Anais [...]*. Santa Catarina: 2010.

VELARDE *et al.* (2021). Mechanical and Physicochemical Properties of 3D-Printed Agave Fibers/Poly(lactic) Acid Biocomposites. *Materials* 2021, [S. l.], v. 14, 3111, 2021. (2021).

WILSON *et al.* The effects of biological examples in idea generation. *Design Studies*, [S. l.], Volume v. 31, Issue n. 2, Pages p. 169-186, ISSN 0142-694X, <https://doi.org/10.1016/j.destud.2009.10.003>. 2010.

