

A natureza abriga uma grande variedade de estruturas biológicas que desempenham a função de proteção e resistência mecânica. As cascas das frutas são exemplos de embalagens naturais, pois protegem, envolvem e armazenam os frutos, além de desempenhar um papel importante na sua proteção. Ao longo de milhões de anos, essas cascas desenvolveram arranjos celulares altamente eficientes em termos de desempenho estrutural. Esses arranjos oferecem proteção direta e indireta contra danos mecânicos e influências ambientais negativas, como resistência a colisões, amortecimento e dissipação de energia.

A biomimética é uma abordagem interdisciplinar que combina o estudo da biologia com a tecnologia e outras disciplinas de inovação, como o design, para resolver desafios técnicos, aprendendo a partir das funções e

estratégias encontradas nos sistemas biológicos. Nesta pesquisa, o objetivo foi estudar as disposições celulares naturais presentes nas frutas tropicais, para a abstração e a prototipação de uma estrutura bioinspirada com propriedades de amortecimento e absorção de impacto. Para explorar inicialmente essa ideia, utilizou-se a observação por microscopia óptica para identificar os diferentes tipos de células presentes no pericarpo e selecionar as frutas apropriadas. Em seguida, com o auxílio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e do método da criofratura, foi possível observar a morfologia e a anatomia vegetalvegetais. A microtomografia computadorizada (Micro-CT) foi utilizada para uma análise estrutural não invasiva, permitindo a reconstrução tridimensional e revelando a conformação celular tridimensional, possibilitando, assim, a abstração da estrutura natural.

Como resultado, este estudo apresenta a prototipação em 3D de uma estrutura bioinspirada que imita as propriedades de amortecimento e absorção de impacto encontradas na natureza. A conclusão da pesquisa destaca o potencial do design em se comunicar com a biologia e as ferramentas tecnológicas, aprofundando o entendimento sobre a natureza e correlacionando princípios estruturais e funcionais biológicos com as necessidades humanas.

A Biomimética biomimética apresenta uma metodologia que se baseia na transferência de conhecimento, buscando aprender com a natureza estratégias que foram aprimoradas ao longo de bilhões de anos. Essa abordagem nos permite descobrir novas formas de cultivar alimentos, desenvolver materiais inovadores, utilizar energia de maneira mais eficiente e até mesmo conduzir negócios. Ao seguir os princípios da Biomimeticabiomimética, podemos fabricar de maneira semelhante à natureza, adotando estratégias de otimização que se baseiam na economia de recursos e na integração multifuncional. Segundo Benyus (1997), a natureza oferece uma infinidade de modelos, estruturas e sistemas naturais que desempenham funções diversas, desde as mais simples até as mais complexas. Esses modelos naturais podem nos inspirar a criar soluções inovadoras e sustentáveis, utilizando os princípios e as estratégias encontradas na natureza.

Ao adotar a Biomimeticabiomimética, podemos aprender com a natureza e aplicar esse conhecimento em diversos campos, como

agricultura, engenharia, design e negócios. Através da observação e do estudo dos sistemas biológicos, podemos encontrar respostas para desafios técnicos e ambientais, além de desenvolver produtos e processos que sejam eficientes, resilientes e harmoniosos com o meio ambiente. Assim, a Biomimética biomimética nos proporciona uma abordagem inovadora e sustentável para resolver problemas e criar soluções inspiradas na natureza, aproveitando a sabedoria acumulada ao longo de bilhões de anos de evolução (Benyus, 1997).

Os sistemas biológicos encontrados na natureza inspiram estudos e projetos de diversas áreas, como a engenharia e o design. Entre as diversas formas de colaboração entre design e biociência, a biomimética é uma disciplina que propõe a transferência da qualidade e funcionalidades biológicas para projetar artefatos. O estudo desses sistemas biológicos é uma resposta adequada aos respectivos desafios que se apresentam como problemas de design (Arruda *et al.*, 2019); (Langella, et al., C., 2019).

Na natureza, geralmente encontramos sistemas simples ou multifuncionais que estão associados a outros sistemas, aos quais são atribuídas diferentes tarefas devido ao fato de desenvolverem diversas funções. Um exemplo disso são as frutas, que desenvolvem várias funcionalidades, tornando-se verdadeiras embalagens naturais desenvolvidas produzidas pela natureza e que apresentam diversas estratégias. Dessa maneira, esta pesquisa se concentrará em uma das principais funções das frutas, que é a de proteção. Nas cascas e sementes das frutas, encontramos estratégias de proteção contra danos mecânicos e radiação ultravioleta, além de estratégias que também podem atrair animais que são vetores para a dispersão das sementes (Antreich *et al.*, 2019); (Bührig-Polaczek *et al.*, (2016); (Kaupp et al.; Naimi-Jamal, 2011); (Sonego *et al.*, 2016).

Explorar a natureza das embalagens naturais significa observar como a vida envolve, protege, contém, preserva, transporta e comunica suas estratégias (Grijalva, 2018). Dessa forma, aplicar essas soluções aos problemas industriais leva-nos aos seguintes problemas de pesquisa: quais estruturas presentes nas embalagens naturais permitem um melhor uso do espaço e do material para um armazenamento e um transporte mais eficientes? Quais frutas possuem uma estrutura hierárquica desenvolvida para a proteção contra impactos

e colisões, proporcionando maior proteção ao que está sendo transportado ou armazenado?

Nas embalagens naturais, são encontradas inúmeras funções, e sendo uma delas é o desempenho de proteção e resistência a colisões e choques mecânicos, presentes nas paredes das frutas, bem como nas cascas e sementes (Broeck, 20182000). Ao longo de milhões de anos de evolução, a natureza vem desenvolvendo criando estratégias que são fundamentais para a manutenção e o desenvolvimento da vida. Dessa forma, na observação da natureza, é introduzida a metodologia biomimética, que consiste em resolver problemas tecnológicos analisando, abstraindo, adaptando e transpondo princípios de inspiração biológica que evoluíram ao longo de milhões ou bilhões de anos como estratégias para o design (Benyus, 1997); (Moreira, F. T. C, *et al.*, 2015).

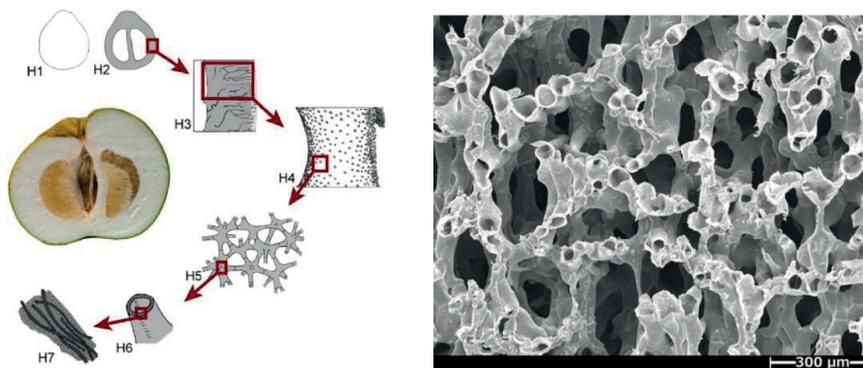


Figura 1: (a) Análise anatômica do pomelo. (b) Imagem MEV do mesocarpo do pomelo. Fonte: (a) Schäfer *et al.* (2020); (b) Fischer *et al.* (2013).

As cascas de frutas, e as cascas das sementes, bem como as espumas e esponjas naturais, normalmente desempenham uma infinidade de funções, desde armazenamento até proteção. Essas funções biológicas consistem na proteção direta ou indireta contra danos mecânicos ou outras influências ambientais negativas e compreendem princípios e construções biológicas que conduzem estudos de modelos para o desenvolvimento de novos materiais e componentes para a proteção de mercadorias e/ou pessoas contra danos causados por impactos devido ao manuseio inadequado ou colisões (Li *et al.*, 2019; Ortiz *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019). O estudo funcional dessa organização estrutural permitirá a construção de novos materiais bioinspirados, leves, de alto impacto e com uma combinação de alta

Figura 2: Crescimento de unidades semelhantes e geometrias de empilhamento. Fonte: (Broeck, (20182000).

dissipação de energia e amortecimento (Bührig-Polaczek *et al.*, 2016; Sanchez, *et al.*,; Arribart; Giraud Guille, 2005; Seidel *et al.*, 2010).

Por meio de pesquisa e análise comparativa, também são identificados padrões e dimensões espaciais, incluindo os efeitos da gravidade e o efeito Coriolis. Esses efeitos influenciam diretamente e geram formas geométricas que se assemelham aos sistemas de embalagem e às estruturas de crescimento encontradas na natureza, conhecidas como voronoi Voronoi (Broeck, 20182000). Os princípios de padrões e mosaicos geométricos encontrados nas frutas serão estudados para indicar os padrões de repetição de arranjos alternativos ou em malha, como aqueles evidentes em nós, redes, acolchoados e técnicas semelhantes presentes especificamente nas frutas, conforme evidenciado na Figura 2. Com isso, temos o resultado da alternância das funções ativas e passivas assumidas pelas fibras durante o processo de construção nos cocos (Lu *et al.*, 20192020).

Esses processos lógicos, com caráter técnico, refletem o sistema presente nas frutas. Dessa maneira, isso qualifica essas estruturas biológicas como modelos para o desenvolvimento de novos materiais e componentes aplicados à solução de problemas de design (Flores-Johnson *et al.*, 2018).



O empilhamento compacto é encontrado em frutas como a Romã romã (Figura 3a) e é caracterizado pela busca de economia de espaço, promovida pela ação de forças externas sobre diversos elementos semelhantes (Figura 3b). Os padrões geométricos tendem a se acomodar da forma mais compacta possível, minimizando as lacunas, o que resulta em um arranjo de empilhamento eficiente, permitindo o aproveitamento eficiente do espaço (Broeck, 20182000).



Figura 3: Geometrias de empilhamento da Romã. Fonte: (a) Google Imagens.; (b) Fonte: Broeck (20182000).

A biomimética faz parte de uma tendência geral de convergência entre biologia, design e tecnologia (Langella, C et. al., 2019). Essa convergência está se tornando uma fonte de inovação do século XXI e está ocorrendo juntamente junto com as transformações na indústria manufatureira, conhecida como Indústria 4.0, que está acontecendo em todo o mundo. Essa transformação está afetando principalmente a forma como os produtos estão sendo projetados e fabricados, oferecendo oportunidades para a transferência mútua de conhecimento e o surgimento potencial de um novo corpo de conhecimento, assim como o aparecimento ou o crescimento exponencial de certas tecnologias, técnicas e modos de produção, conhecidas como indústrias inteligentes. Este estudo adotará como definição metodológica a terminologia biomimética, embora existam várias definições, incluindo a biônica, o design bioinspirado e a *biomimicry*. Em alguns países, todas essas terminologias são consideradas sinônimos, mas em outros, esses termos são compreendidos de maneiras diferentes. A distinção entre esses termos biológicos nem sempre é clara e pode causar confusão tanto para pesquisadores e profissionais novatos quanto para os experientes.

Com isso, para uma melhor compreensão dos termos utilizados,

foi adicionada pela International Organization for Standardization a norma ISO/TC 266 *Biomimetics*, que inclui a ISO 18458:2015 *Biomimetics – Terminology, concepts and methodology*, que apresenta algumas terminologias relacionadas à compreensão da natureza como inspiração (Langella, et. al, 2019).

A bioinspiração, ou *bioinspiration*, significa observar os sistemas biológicos como fonte de inspiração, com aplicação na criatividade, na inovação e no design. A bioinspiração é um campo de sucesso e de rápido crescimento que utiliza *insights* sobre a função dos sistemas biológicos para desenvolver novos conceitos de engenharia. No entanto, apenas uma pequena parcela da biodiversidade do mundo tem sido considerada como uma possível fonte de inspiração para a engenharia até agora. Isso significa que um grande número de sistemas biológicos com alto potencial de valor de engenharia provavelmente passou despercebido (Kanda; De Oliveira Souza; De Held, et al., 2018; Müller et al., 2018).

A bioinspiração só pode ganhar força na economia se for tratada como um objetivo empresarial, e não filosófico. A bioinspiração está influenciando diversos campos do conhecimento de diferentes maneiras, mas possui o potencial de transformar grandes segmentos industriais nas próximas décadas. A bioinspiração está fazendo as incursões mais significativas em três áreas principais, com base no número de patentes, artigos acadêmicos e produtos comerciais em desenvolvimento ou no mercado: química, ciência dos materiais e engenharia. Esses avanços estão, por sua vez, tendo um impacto em indústrias que vão desde a agricultura até equipamentos de transporte e construção (Ataide, 2013).

BIOMIMÉTICA, : PRINCÍPIOS E CONTEXTUALIZAÇÃO

Nos últimos anos, a biomimética tem sido cada vez mais utilizada no campo das pesquisas aplicadas para o desenvolvimento de novos produtos e materiais. ,C com alto potencial de inovação e grande possibilidade de oferecer novos produtos bioinspirados e cadeias produtivas sustentáveis (Speck et al., 2018). O avanço tecnológico

trouxe enormes possibilidades, principalmente no campo do design, para o desenvolvimento de novas técnicas e dispositivos que estão ligados ao potencial de novos materiais, interação, fatores humanos, percepção, cognição e experiência do usuário. Esse progresso trouxe profundas consequências em vários campos das ciências, seja tanto no intelectual ou quanto no prático (Oliveira *et al.*, 2021).

Ao longo de milhões de anos, a natureza vem desenvolvendo materiais e estruturas de alto desempenho, fornecendo fontes valiosas de inspiração para o projeto de materiais estruturais com o objetivo de melhorar ou desenvolver novos produtos, dada a variedade de excelentes propriedades encontradas na natureza. Com o intuito de aprimorar os materiais e as estruturas tradicionais para a absorção de energia, cientistas, engenheiros e designers buscam aprender com organismos biológicos que possuem estruturas resistentes que evoluíram de forma otimizada ao longo das gerações (San Ha *et al.*, 20192020). Dessa forma, a biologia natural oferece estruturas excelentes com notável capacidade de absorção, dissipação de energia e alta resistência ao impacto.

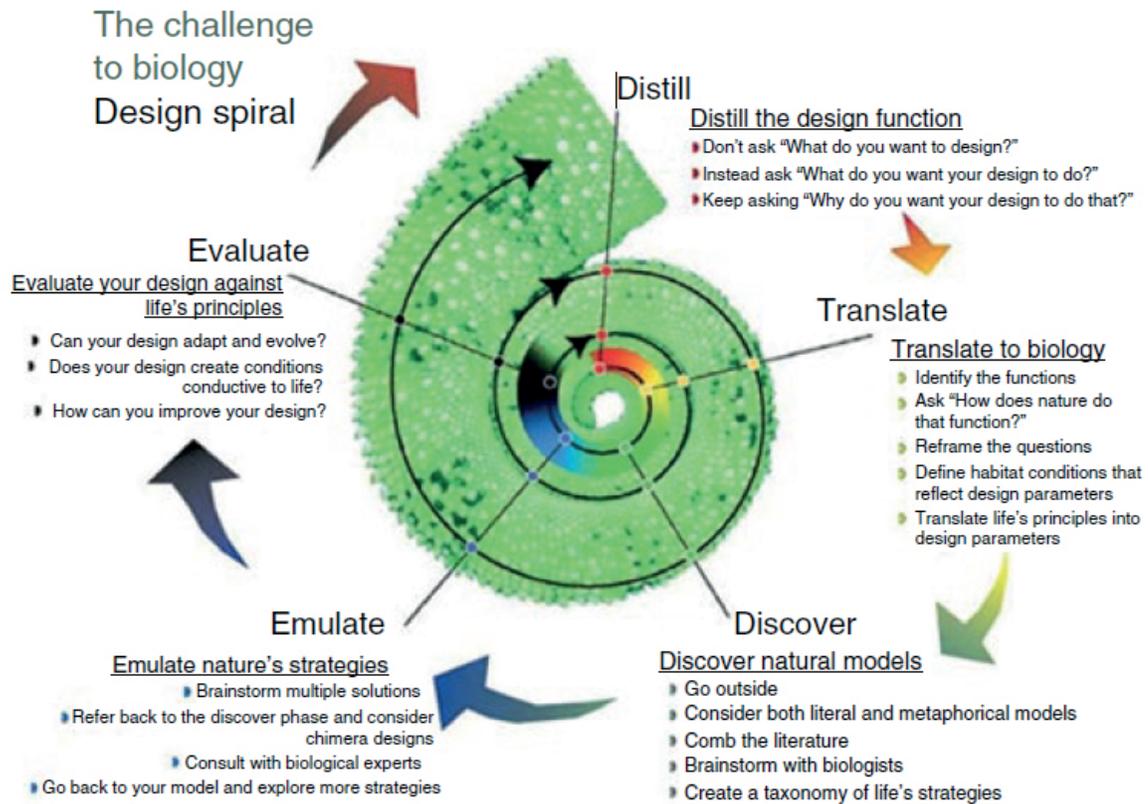
O termo cunhado por Janine Benyus em seu livro de 1997, *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, significa: Biomimética biomimética (de *bios*, significando vida, e *mimese*, significando imitar); o termo foi geralmente definido como "o exame da natureza, seus modelos, sistemas, processos e elementos para emular ou se inspirar para resolver problemas humanos". (Benyus, 1997, p. XX). A resolução de problemas humanos tem sido uma grande força motriz neste nesse campo de pesquisa. A biomimética como um conceito científico vem atraindo a imaginação de pesquisadores muito além dos objetivos de produzir melhores drogas, e órgãos artificiais ou novos produtos bioinspirados, mas, sim, como uma base e inspiração para novas maneiras inovadoras de projetar e compreender a matéria em um nível mais profundo (Jelinek, 2013).

Nunca antes a biologia foi uma inspiração tão grande para inovações. Hoje, a grande maioria dos engenheiros e cientistas de materiais está ciente dessa fonte de ideias para o desenvolvimento de tecnologias. No entanto, uma vez que a funcionalidade dos sistemas biológicos é frequentemente baseada em sua extrema complexidade, não há muitos exemplos de ideias implementadas com sucesso

na tecnologia moderna. Por essa razão, a bioinspiração, a biomimética e a biorreplicação requerem não apenas intensa pesquisa experimental no campo da biologia, mas também uma estratégia de abstração para extrair características essenciais responsáveis por uma função específica de um sistema biológico. Portanto, antes de transferir os princípios biológicos para a tecnologia, devemos reconhecer e distinguir esses princípios em meio a uma enorme complexidade biológica. A primeira abordagem é a biologia clássica, na qual um sistema funcional específico é estudado comparativamente em relação a vários organismos. Nesse caso, podemos potencialmente reconhecer as mesmas soluções funcionais que evoluíram várias vezes, de forma independente, na evolução de diferentes grupos de organismos. Além disso, obtemos informações sobre a diversidade de soluções. Essa abordagem comparativa consome tempo, mas pode ser muito eficaz para a bioinspiração, levando à biomimética e à biorreplicação (Lakhtakia; Martín-Palma, 2013).

O princípio fundamental da biomimética é usar o mundo biológico natural como fonte de inspiração e como um guia no desenvolvimento de novos materiais. É necessário um estudo detalhado dos sistemas e organismos presentes nos sistemas naturais, os quais podem ser utilizados como modelos na ciência e na engenharia de novos materiais. No entanto, deve-se reconhecer que tal estudo deve precisa se concentrar na elucidação das relações entre estrutura e função em sistemas naturais, a fim de aplicar os resultados desse estudo na engenharia (Ellison, M. S., 2013).

A evolução da biomimética gerou vários termos em torno dos quais é possível formar discussões. Um dos primeiros termos para esse campo é “biônica”, e a “biomimética” foi cunhada no início dos anos 1950. A biônica se tornou um termo muito mais popularizado, em parte graças à indústria do entretenimento (o programa de televisão *The Bionic Woman*, por exemplo), enquanto biomimética e *biomimicry* permaneceram sob a alçada da comunidade científica. Outros termos também estão em uso. O relatório do NRC *Inspired by Biology* forneceu as seguintes definições.



Rowland (2017) apresenta quatro fases (Figura 5) do processo biomimético que descrevem a posição de ensiná-lo aos desenvolvedores de produtos e serviços, processos, estruturas e sistemas projetados para futuros sustentáveis e soluções potenciais para problemas humanos. As quatro fases do processo de design de pensamento biomimético para abordar desafios utilizando a biologia são descritas pela autora.

Etapa 1. Definição do escopo: Inicia-se com a contextualização do problema de design, descrevendo o desafio/problema de design escolhido e o contexto em que surge a problemática. É apresentada uma solução potencial de design, listando a função específica que essa solução deve cumprir, com base em um resultado esperado e nos princípios de vida mais relevantes para o tipo específico de desafio de projeto.

Etapa 2. Descoberta: Começa com uma investigação baseada na função do design, a partir de uma pergunta de pesquisa

Figura 4: *How to use reverse biomimicry in product design.*

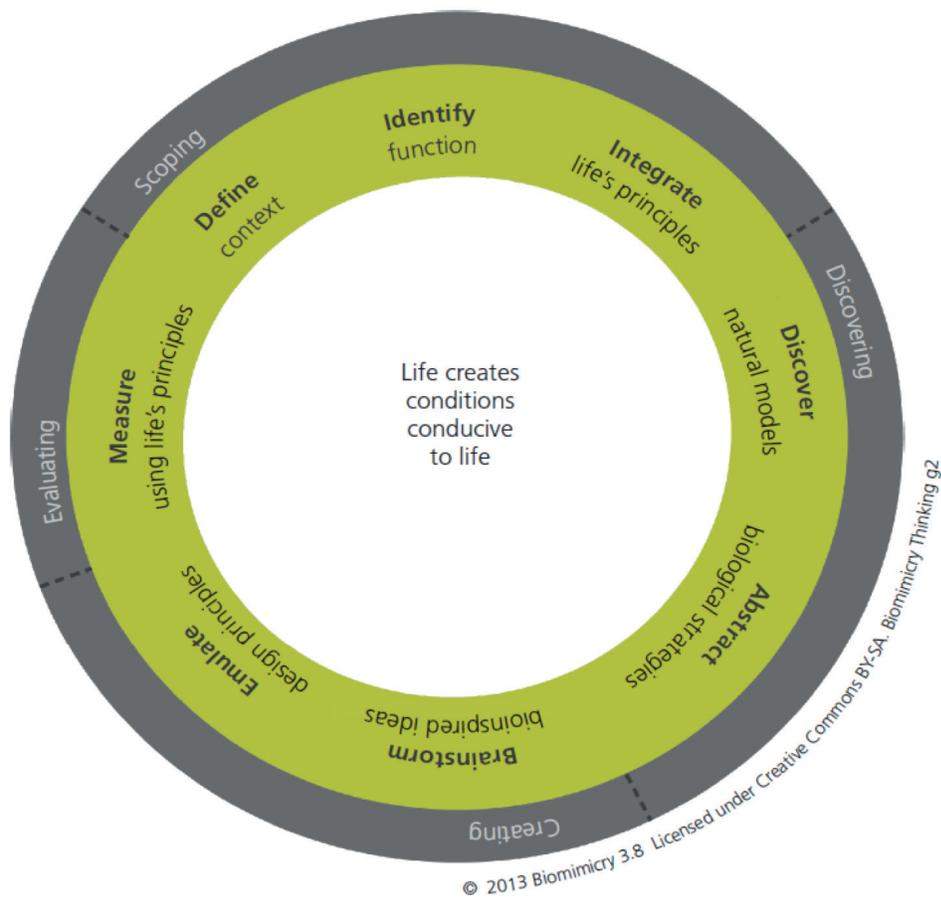
Fonte: Biomimicry Institute.

Figura 5: *Biomimicry thinking process.* Fonte: (Rowland, (2017).

fundamentada na biologia. Uma ferramenta muito útil para abordar questões do campo da pesquisa biológica é a taxonomia da biomimética, que auxilia especialmente os não biólogos a encontrar a terminologia correta para pesquisar funções específicas na literatura científica.

Etapa 3. Criação: Envolve a participação de colaboradores de diversas disciplinas, a fim de trazer uma variedade de novas perspectivas para o design.

Etapa 4. Avaliação: Nesta etapa, um protótipo é apresentado e avaliado de forma formal, considerando os princípios da biomimética. O princípio biológico é abordado separadamente e de maneira abrangente, discutindo-se como ele está incorporado na solução proposta final e o que precisaria ser aprimorado para alcançar uma melhor correspondência com os padrões encontrados na natureza.



BIOINSPIRAÇÃO

A natureza, com sua extraordinária diversidade, oferece uma variedade aparentemente "infinita" de possibilidades para o desenvolvimento de produtos e materiais inovadores. Essa afirmação abrange materiais biomiméticos que englobam desde as dimensões micro e nanoescala até estudos em nível molecular. Na natureza, encontramos princípios que precisam ser compreendidos e interpretados com um caráter sistemático, a fim de estabelecer analogias para o desenvolvimento de projetos bioinspirados. Dessa forma, esses princípios podem ser aplicados na resolução de problemas de design (Arruda, 2002).

A exploração de conceitos e materiais naturais pode assumir diferentes formas, desde o uso de biomoléculas reais para aplicações humanas, como a "prospecção" da floresta tropical em busca de substâncias com potencial farmacêutico, até a fabricação de novos materiais cujas características estruturais e organização hierárquica são inspiradas pela natureza. A bioinspiração abrange e discute exemplos de sistemas, com ênfase em novas funcionalidades que incorporam a integração de conceitos biológicos, de um lado, e o mundo da ciência dos materiais, do outro. Como tal, esse campo multidisciplinar, baseado principalmente na em biologia, nanotecnologia, ciência dos materiais e disciplinas relacionadas, continua a produzir novos materiais, processos e conceitos utilizados em uma variedade de aplicações (Jelinek, 2013).

Para isso, é essencial compreender o fenômeno biológico, os materiais biológicos naturais e os processos envolvidos em sua produção natural, e, assim, desenvolver abordagens de biofabricação ou fabricação bioinspirada. A compreensão das funções fornecidas pelas espécies e processos encontrados na natureza viva pode nos orientar na produção de nanomateriais, nanodispositivos e processos com funcionalidades desejáveis. Os materiais encontrados na natureza possuem inúmeras características intrigantes, como complexidade, miniaturização, estrutura hierárquica, hibridação, resiliência e adaptabilidade. É necessária uma abordagem multidisciplinar para elucidar os componentes subjacentes e os princípios de construção determinados pela evolução, a fim de fornecer materiais mais confiáveis, eficientes e ecologicamente corretos (Sanchez; Arribart; Giraud Guille, 2005).

DESIGN PARAMÉTRICO

O design paramétrico envolve um método computacional para projetar um sistema de funções determinadas que irão guiar a criação do objeto, permitindo a geração de uma ampla gama de variações geométricas. O design paramétrico começa com um modelo base e utiliza parâmetros para controlar a geometria, possibilitando a criação de diversas possibilidades de design por meio de um conjunto planejado de regras e algoritmos. A modelagem paramétrica é um processo de modelagem que pode ser simulado em um computador, permitindo uma abordagem de modelagem semelhante ao desenvolvimento genético estudado na Biologiabiologia.

Segundo Langella, C. & Santulli, C. (2017), o interesse pelo design natural também chama a atenção para questões biológicas relacionadas à vida dos organismos e sua remodelação gradual e contínua, que possui paralelos com os processos de formação aditiva atuais. Nesses processos, a estrutura começa com uma linha reta e depois se conforma e se adapta, enquanto na natureza, a evolução ocorre a partir de uma espiral, permitindo o desenvolvimento de criaturas em que a linearidade existe apenas como uma abstração conceitual. No entanto, ao focar nas questões de design, os designers são capazes de sugerir com sucesso semelhanças com as estratégias evolutivas utilizadas pelos organismos biológicos.

As formas e os princípios utilizados no design paramétrico são derivados, em alguns casos, da transposição das lógicas de crescimento estudadas e traduzidas por biólogos, matemáticos e engenheiros em modelos ideais e algoritmos recorrentes na natureza. Essa transferência é baseada em analogias estratégicas, mas nem sempre segue uma base científica biológico-matemática efetiva. É fundamental que os designers interessados na dimensão do design paramétrico entendam que o uso de algoritmos inspirados na biologia permite alcançar não apenas morfologias esteticamente agradáveis e complexas, mas também otimização estrutural, hierarquização, conservação de energia, resiliência, colaboração sinérgica, adaptabilidade e flexibilidade, que fornecem a base para a formação dessas morfologias na natureza e podem ser muito relevantes no projeto (Hooker *et al.*, 2016 *apud* Langella, C. & Santulli, C., 2017).

EMBALAGENS NATURAIS

As frutas podem desenvolver diversas estratégias, algumas das quais estão relacionadas à perpetuação da espécie. Assim, elas podem apresentar estruturas que proporcionam uma maior proteção contra choques mecânicos, como é evidenciado nas frutas tropicais. Além disso, podem possuir ter estruturas hierárquicas semelhantes às encontradas no pomelo ou apresentar uma organização interna surpreendente para otimizar o aproveitamento do espaço, como ocorre nas romãs (Fischer, 2010; (Oliveira *et al.*, 2021; Schäfer, 2020).

As plantas representam quase 99,9% da biomassa do nosso planeta. Isso significa que praticamente todos os ambientes que podem ser colonizados pela vida foram explorados e povoados por plantas. Para alcançar resultados tão surpreendentes sem conseguir se mover do local de germinação das sementes, as plantas desenvolveram um conjunto de soluções que as tornam adaptadas para viver em condições extremas e desafiadoras (Preiß, S.,; Degenhardt, J., & Gershenzon, J., 2014).

Além disso, é bem estabelecido que as plantas e seus frutos têm a capacidade de exibir considerável plasticidade em sua morfologia e fisiologia, em resposta à variabilidade do ambiente. Elas são capazes de sobreviver a uma ampla gama de condições e estresses ambientais diversos. Ao explorar a natureza das embalagens naturais, podemos observar como a vida envolve, protege, contém, preserva, transporta e comunica suas estratégias (Grijalva, 2018).

As cascas das frutas desempenham um papel de proteção e identificação das mercadorias, assim como as embalagens artificiais (Hallett, I. C. & Sutherland, P. W., 2006). Portanto, aplicar essas soluções aos problemas industriais é uma abordagem promissora. Um dos grandes avanços na ciência dos materiais hoje em dia é a inspiração na natureza (Arruda, 2002). A busca por soluções naturais permite o desenvolvimento de novos materiais com propriedades estruturais aprimoradas, que podem ser aplicados em diversos campos, incluindo produtos de consumo, automotivo e arquitetura. Esses materiais também podem apresentar capacidades de sensoriamento e atuação avançadas (Zhang, W., *et al.* Yin, S., Yu, T. X., & Xu, J., 2019).

Figura 6: Estratégias das embalagens naturais. Fonte: autores

Na Figura 6, são apresentadas várias estratégias encontradas nas embalagens naturais das cascas das frutas, que envolvem, preservam e protegem as sementes contra possíveis choques. As sementes desempenham um papel crucial na preservação do material genético e na dispersão das plantas ao longo das gerações. Elas são produzidas e embaladas em estruturas botânicas que podem ser chamadas de embalagens naturais. Essas embalagens possuem estratégias de empilhamento que otimizam o aproveitamento do volume interno do endocarpo. Algumas frutas apresentam cores estruturais que atraem certos tipos de insetos, permitindo a comunicação e a polinização das flores. Além disso, algumas frutas possuem cascas que permitem o transporte seguro das sementes para outros locais. Cada uma dessas estratégias está estruturada de forma a facilitar a compreensão, apresentando quatro campos de estratégias nas embalagens naturais.



ETAPAS METODOLÓGICAS/ATIVIDADE/ MÉTODO E FERRAMENTAS

Nesta pesquisa, foram desenvolvidas quatro fases com suas respectivas etapas metodológicas, abordando as principais atividades, e referências teóricas, assim como os métodos e ferramentas necessárias necessários para o desenvolvimento empírico da pesquisa. As fases dessa pesquisa estão integradas nas etapas dos diagramas que compõem o Biomimicry DesignLens. Essa abordagem metodológica foi desenvolvida pelo Biomimicry Institute 3.8 e inclui o Biomimicry Design Thinking. Os detalhes dessa abordagem estão enquadrados nas etapas e fases do diagrama Biologia para Design, que é uma metodologia flexível para processos criativos com aplicação de modelos da natureza na criação de soluções inovadoras bioinspiradas.

O diálogo ocorre de forma contínua em todas as etapas durante o desenvolvimento desta tese. A abordagem Biologia para Design foi selecionada por apresentar um método didático que se aproxima do tipo de abordagem *bottom-up* no projeto, facilitando a consecução dos objetivos diante da problemática apresentada.

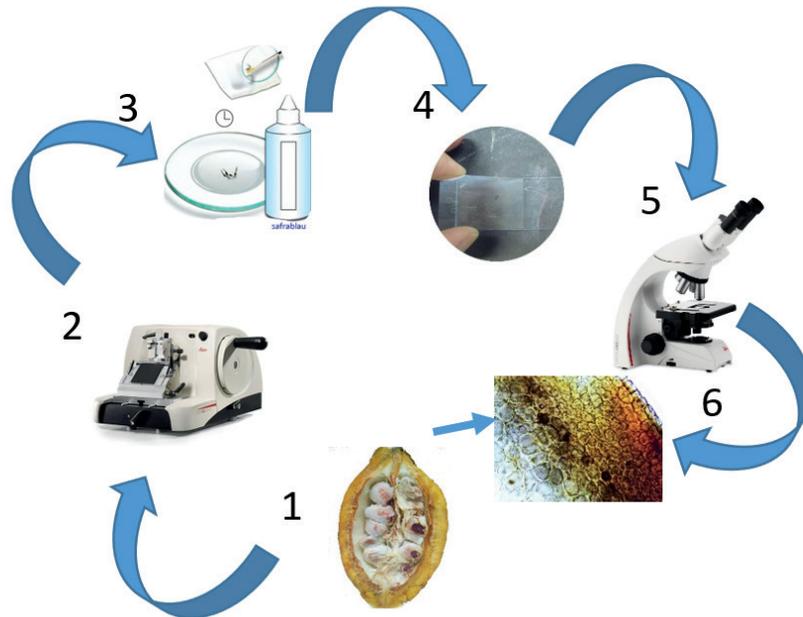
O *Biomimicry Thinking* é composto por quatro áreas em que o processo se desenvolve: definição de escopo, descoberta, criação e avaliação. Seguindo os passos do método Biologia para Design e suas etapas específicas, esta pesquisa apresenta os requisitos necessários e integra-se com sucesso às estratégias e aos princípios da vida no campo de projetos bioinspirados.

LABORATÓRIO DE ANATOMIA VEGETAL (LAVEG – UFPE)

O Laboratório de Anatomia Vegetal da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), coordenado pela Prof.^a Dr.^a Emília Cristina Pereira Arruda, desempenhou um papel fundamental na pesquisa exploratória realizada nesta metodologia de pesquisa-ação para a análise e compilação dos resultados obtidos das estruturas encontradas. No LAVeg foi realizado o estudo de anatomia vegetal por

Figura 7: Fases da preparação para microscopia óptica, (LAVeg – UFPE). Fonte: autor

meio de microscopia óptica, que revela as estruturas dos tecidos celulares e suas distribuições no pericarpo do fruto, por meio do uso de feixe de luz. Abaixo A seguir, segue temos um no esquema na da Figura 7 do procedimento realizado de acordo com Ruzin (1999).



A Anatomia Vegetal é uma disciplina que estuda as células, tecidos e estruturas internas dos organismos vegetais. Para realizar essa análise, é necessário utilizar um microscópio óptico e seguir uma série de procedimentos prévios. Esses procedimentos, conhecidos como técnicas de histologia, permitem estudar as células e os tecidos vegetais em detalhes. O objetivo da análise de anatomia vegetal é preparar as amostras para serem estudadas sob um microscópio de luz. No microscópio, a observação é realizada por meio de luz transmitida, o que significa que a luz precisa passar pelo objeto em análise. Portanto, é necessário obter fragmentos de tecido vegetal que sejam coletados em lâminas muito finas e transparentes para possibilitar a observação das estruturas microscópicas (Ruzin, 1999).



Figura 8: Pesquisa exploratória e imagens de microscopia óptica. Fonte: autor

Após a pesquisa exploratória, foi possível identificar critérios de inclusão e exclusão das frutas com base na análise de imagens de microscopia óptica. Essa análise permitiu selecionar um novo grupo de frutas para uma investigação mais aprofundada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Nesse estudo, foram caracterizados os elementos biológicos das frutas selecionadas, identificando aquelas que apresentavam melhores características para o desenvolvimento de estruturas bioinspiradas, alinhadas aos princípios de design. Essa fase de abstração das estratégias biológicas busca encontrar uma área de aplicação para as estruturas de dissipação de energia.

O estudo de microscopia eletrônica de varredura foi realizado com quatro frutas: cacau (*Theobroma cacao* L.), maracujá (*Passiflora* sp), laranja (*Citrus*) e romã (*Punica granatum*). A seleção dessas frutas foi realizada por meio do método Delphi, levando em consideração as análises de anatomia vegetal realizadas por microscopia óptica convencional.

Após essas análises, duas frutas (fruta-pão e pitaia) foram descartadas, pois não possuíam características relevantes para os propósitos deste estudo. Em substituição, foram incluídas duas novas frutas: laranja e romã, formando dois grupos distintos. O primeiro grupo é composto por laranja e maracujá, enquanto o segundo grupo é formado por cacau e romã. Essas frutas foram escolhidas para a realização da nova análise proposta nesta pesquisa.

Figura 9: Microscopia eletrônica de varredura (MEV). Fonte: autor

As seções das amostras vegetais foram realizadas utilizando o criostato Leica CM 1850[®] para preservação em baixa temperatura. Esse instrumento é projetado para congelamento rápido e corte de amostras de tecido. Os fragmentos foram seccionados em lâminas de 50 micrômetros de espessura, seguindo a orientação de corte longitudinal. Os cortes foram cuidadosamente colocados em lâminas previamente identificadas e arquivadas em caixas apropriadas dentro de um congelador a -26°C para fixação.



ANÁLISES DOS RESULTADOS OU DISCUSSÕES

Foram realizados procedimentos de escaneamento nas quatro frutas: cacau, laranja, maracujá e romã. Através das análises de escaneamento, foi feito o recorte da pesquisa e a laranja (*Citrus sinensis*) foi selecionada para análise por meio de um *software* especializado em digitalização de tomografia computadorizada (TC) industrial. Foram selecionados módulos específicos para o estudo, resultando na fase de criação com a reconstrução em 3D, determinação da superfície e do material. Em seguida, na fase de avaliação, realizou-se a investigação da estrutura utilizando o módulo de análise 3D de

porosidade. Essa etapa da pesquisa foi desenvolvida em colaboração com o Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN-UFPE (Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco)). Utilizou-se o equipamento XT H 225 ST para a captura das imagens de microtomografia computadorizada de raio-X (Micro-CT) e a medição detalhada dos componentes internos que são necessários para recursos de reconstrução tridimensional, análise de falhas e pesquisa de materiais.

Figura 10: Esq. À esquerda, Industrial CT Scanning – XT H 225 ST. Fonte: elaborado elaborada pelos autores em colaboração com o DEN.



A tomografia computadorizada é comumente utilizada para visualizar a estrutura interna de peças industriais complexas. No entanto, neste estudo, ela foi empregada para uma observação não invasiva em amostras vegetais. O Micro-CT foi utilizado para quantificar as dimensões internas e externas das amostras vegetais de forma suave, rápida e não destrutiva. Embora o procedimento tenha sido realizado de maneira não invasiva, foi necessário fazer o escaneamento em pedaços menores para obter uma resolução mais precisa das estruturas internas dos frutos. A Figura abaixo 11 mostra imagens de raio-x tanto de pedaços quanto de frutos inteiros das amostras.

Figura 11: Processo de escaneamento no XT H 225 ST. Fonte: elaborado pelos autores.



A determinação da superfície e dos materiais foi realizada com auxílio do *software* VGStudio Max, no qual foi criada uma área de interesse (ROI) já observada nas imagens de MEV. A região está localizada no mesocarpo médio, correspondente à parte branca do pericarpo, chamada de albedo. O escaneamento foi realizado no fruto inteiro e também em um pedaço, conforme a Figura 5, com dimensões de 5 x 5 mm, para ampliar o tamanho do pixel e obter uma maior resolução na reconstrução TC devido ao tamanho do voxel.

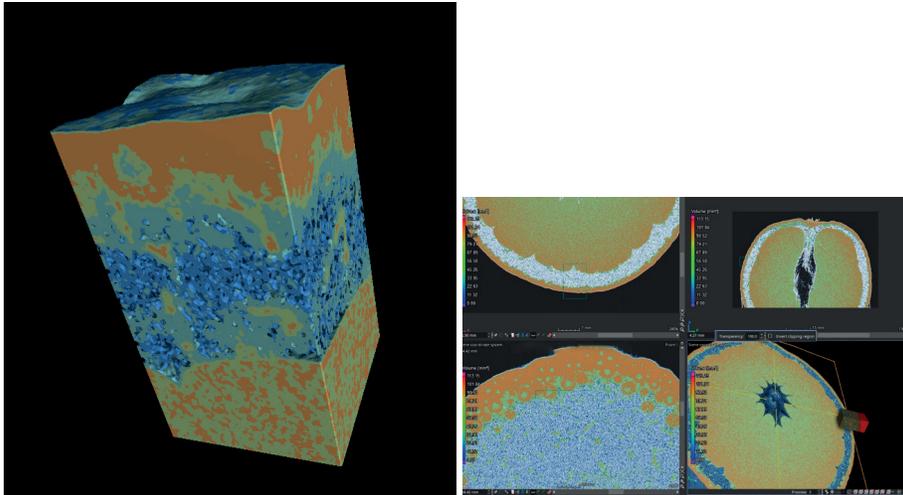


Figura 12: Esq. À esquerda, Análise análise dos materiais. Dir. À direita, seleção da *mesh* da área de interesse. Fonte: elaborado pelos autores.

Toda a metrologia baseada em tomografia computadorizada depende de uma determinação precisa da superfície no modelo de voxel. Quanto mais precisa for a determinação da superfície, menor será a incerteza de medição. A determinação da superfície permite o modo de multimateriais, o que possibilita a determinação simultânea das superfícies de vários materiais dentro de um volume, resultando em um componente por material.

As malhas tetraédricas (*meshes*) podem ser exportadas para simulações FEM de método dos **elementos finitos** (MEF) em outro *software* para criar *meshes* de integração. Dessa forma, foi possível converter um conjunto de dados de volume monomaterial (imagens 2D) das amostras vegetais em uma malha tetraédrica. A tomografia computadorizada permite realizar ensaios não destrutivos em peças. O estudo de seções transversais simples possibilita a detecção de poros existentes e inclusões de outros materiais.

Na Figura 13, é observado um recorte espacial em formato cúbico que delimita a área de interesse, apresentando uma hierarquia estrutural e espaços entre as células que têm como estratégia a absorção de energia. Na Figura 15, temos uma análise de porosidade da estrutura da qual foi retirada a *mesh*, que corresponde a aproximadamente 44% de porosidade, por meio da análise tridimensional de porosidade (3D Porosity Analysis), que reconhece e caracteriza a porosidade em três dimensões.

Figura 13: Esq.À esquerda, V volume *mesh* gerada no VGstudio max. Dir.À direita, Análise de porosidade. Fonte: elaborado pelos autores.

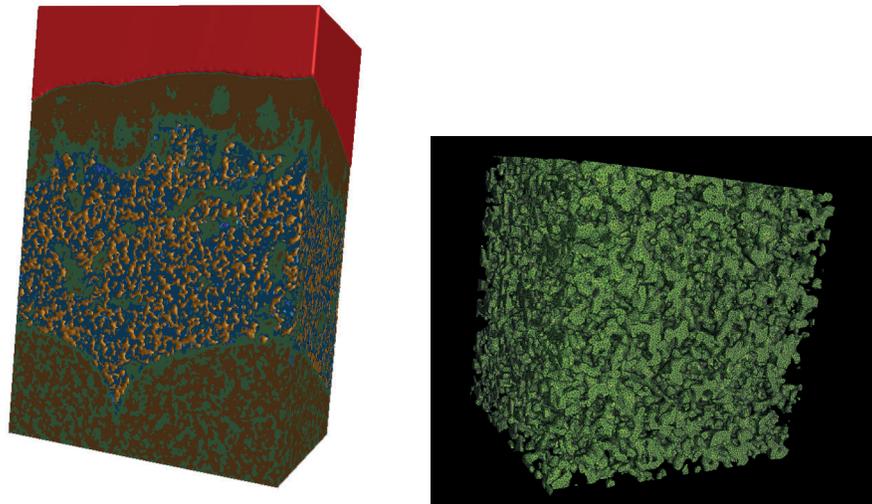
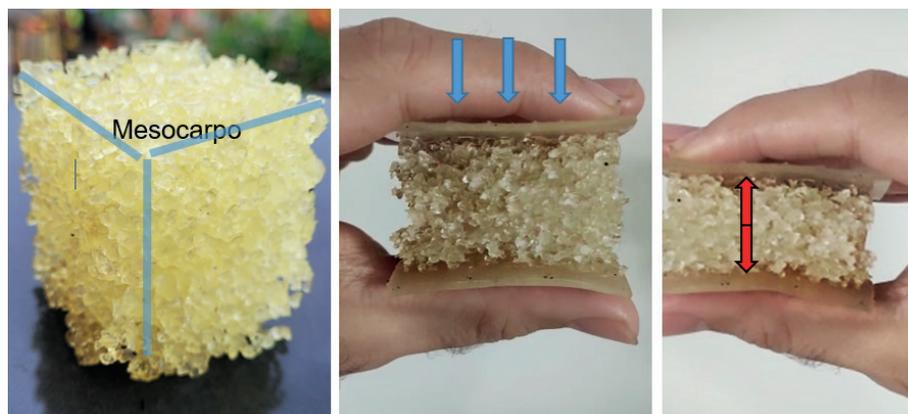


Figura 14: (a) Estrutura bioinspirada, . (b) Tensão de compressão. (c) Deslocamento. Fonte: elaborado pelos autores.

Na etapa de prototipação da estrutura bioinspirada por fabricação digital, são geradas alternativas de estruturas com base nos frutos estudados. Essas estruturas são projetadas levando em consideração a otimização do material utilizado (volumetria) e a capacidade de absorção de energia. Em seguida, essas estruturas serão avaliadas em *softwares* de simulação física por meio de cálculos matemáticos, na próxima fase da pesquisa.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos organismos encontrados na natureza, independentemente de sua simplicidade ou complexidade, oferece uma variedade de materiais, estruturas arquitetônicas, sistemas e funções que podem ser usados como referência e incorporados no processo de design para diversas aplicações. Com base nisso, este estudo investigou estratégias presentes nas frutas que desempenham a função de proteção, as quais podem ser utilizadas em várias áreas como uma ferramenta estratégica no desenvolvimento de produtos inspirados na natureza, buscando soluções para sistemas de amortecimento, proteção contra impactos mecânicos e absorção de energia.

No entanto, além de seu apelo estético, elas também possuem mecanismos de proteção eficientes para garantir a sobrevivência e a disseminação de suas sementes. Essas estratégias podem servir de base para o desenvolvimento de produtos inovadores e sustentáveis. Essa propriedade pode ser explorada no design de produtos que requerem sistemas de amortecimento eficientes, como calçados esportivos, equipamentos de proteção para atletas ou até mesmo sistemas de absorção de impacto em veículos. A compreensão desses mecanismos naturais pode levar a soluções inovadoras e, mais sustentáveis e de grande interesse para indústria técnica.

Esse estudo demonstra como a natureza é uma fonte “infinita” de inspiração para o design e o desenvolvimento de produtos inovadores. A análise detalhada dos organismos encontrados na natureza revela estratégias sofisticadas que podem ser aplicadas em várias áreas. Ao incorporar essas estratégias naturais no processo de design, podemos criar produtos mais eficientes, sustentáveis e resilientes. A utilização de materiais inspirados nas propriedades das frutas e outros organismos naturais pode resultar em soluções que superam as alternativas convencionais. A natureza, com toda a sua sabedoria acumulada ao longo de milhões de anos, nos oferece um verdadeiro catálogo de soluções que podem ser adaptadas e aprimoradas para atender às necessidades da sociedade. Portanto, ao buscar o desenvolvimento de produtos de alta qualidade e eficiência, devemos olhar para a natureza como uma fonte inesgotável de inspiração e conhecimento.

REFERÊNCIAS

ANTREICH, Sebastian S. J. *et al.* The puzzle of the walnut shell: a novel cell type with interlocked packing. *Advanced Science*, [S. l.], v. 6, n. 16, p. 1900644, 2019.

ARRUDA, AMILTON A. JOSÉ J. VIEIRA.. *Bionic Basic: verso um nuovo modello di ricerca progettuale*. 2002. Tese de (Doutorado. Tese de doutorado em Desenho Industrial e Comunicação MultimidiaDesenho Industrial,) – Politecnico di Milano–,Doutorado em Desenho Industrial e Comunicação Multimidia, Milão, 2002.

ATAIDE, R. M.; GALLAGHER, C. L. Bioinspiration: an economic progress report. *Technical Report*, 2013.

BENYUS, J. M. *Biomimicry*. New York: Harper-Collins, 2002.

BÜHRIG-POLACZEK, A. *et al.* Biomimetic cellular metals – using hierarchical structuring for energy absorption. *Bioinspiration & biomimetics*, [S. l.], v. 11, n. 4, p. 045002, 2016.

DE OLIVEIRA, Antônio A. Roberto R. MirandaM.; DE ARRUDA, Amilton A. José J. VieiraV.; LANGELLA, Carla.. Biomimetics as a strategy for the development of bioinspired structures for energy absorption based on fruits. *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. , Ensayos*, [S. l.], n. 149, p. 189-206, 2021.

ELLISON, Michael M. S. Engineered Biomimicry: Chapter 10. *Biomimetic Textiles*. Elsevier Inc. Chapters, 2013.

FISCHER, Sebastian S. F. *et al.* Pummelos as concept generators for biomimetically inspired low weight structures with excellent damping properties. *Advanced Engineering Materials*, [S. l.], v. 12, n. 12, p. B658-B663, 2010.

FLORES-JOHNSON, E. A. *et al.* Microstructure and mechanical properties of hard *Acrocomia mexicana* fruit shell, . *Sci. Rep.*, [S. l.], v. 8, p. 1-12, (2018) 1–12.

GRIJALVA, Sergio S. F. *La naturaleza del embalaje: la naturaleza como fuente de innovación para empaques*. Local: Caligrama, 2018.

- J.M. BENYUSJ. M.. *Biomimicry*. Harper-Collins, New York, NY, USA, 2002.
- JELINEK: . *Biomimetics*. : A Molecular Perspective. 2013., ISBN: 978-3-11-028117-0
- KANDA, G. B.; DE OLIVEIRA SOUZA, RejaneR.; DE HELD, Maria M. Sílvia S. Barros. Matriz morfológica e biomimética: geração de alternativas em design. *Projetica*, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 53-68, 2018.
- KAUPP, GerdG.; NAIMI-JAMAL, Mohammad M. Reza. Nutshells' mechanical response: from nanoindentation and structure to bionics models. *Journal of Materials Chemistry*, [S. l.], v. 21, n. 23, p. 8389-8400, 2011.
- LAKHTAKIA, A.; MARTÍN-PALMA, R. J. (Eded.). *Engineered biomimicry*. Newnes, 2013.
- LANGELLA, Carla. *Design e scienza*. List-Laboratorio Editoriale, 2019.
- LANGELLA, CarlaC.; SANTULLI, CarloC.. Processi di crescita biologica e Design parametrico. *MD Journal*, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 14-27, 2017.
- LU, Chuanhao C. *et al*. The mystery of coconut overturns the crash-worthiness design of composite materials. *International Journal of Mechanical Sciences*, [S. l.], v. 168, p. 105244, 2020.
- MOREIRA, Felismina F. TC *et al*. Synthesis of molecular biomimetics. *In: Biomimetic Technologies*. Woodhead Publishing, 2015. p. 3-31.
- MÜLLER, R. *et al*. Biodiversifying bioinspiration. *Bioinspiration & Biomimetics*, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 053001, 2018.
- PREIß, SusanneS.; DEGENHARDT, JörgJ.; GERSHENZON, Jonathan. Plant-Animal Dialogues. *Ecological biochemistry: environmental and interspecies interactions*, [S. l.], p. 312-330, 2014.
- ROWLAND, Regina. Biomimicry step-by-step. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 102-112, 2017.
- RUZIN, Steven S. E. *et al*. *Plant microtechnique and microscopy*. New York: Oxford University Press, 1999.
- SAN HA, Ngoc N. *et al*. Mechanical properties and energy absorption

characteristics of tropical fruit durian (*Durio zibethinus*). *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, [S. l.], v. 104, p. 103603, 2020.

SANCHEZ, ClémentC.; ARRIBART, HervéH.; GIRAUD GUILLE, Marie M. Madeleine. Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems. *Nature materials*, [S. l.], v. 4, n. 4, p. 277-288, 2005a.

SANCHEZ, ClémentC.; ARRIBART, HervéH.; GIRAUD GUILLE, Marie M. Madeleine. Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems. *Nature materials*, [S. l.], v. 4, n. 4, p. 277-288, 2005b.

SCHÄFER, I. *et al.* Modelling the damping response of biomimetic foams based on pomelo fruit. *Computational Materials Science*, [S. l.], v. 183, p. 109801, 2020.

SEIDEL, R. *et al.* Fruit walls and nut shells as an inspiration for the design of bio-inspired impact resistant hierarchically structured materials. *Design and Nature V*, [S. l.], p. 421-430, 2010.

SONEGO, MariliaM.; FLECK, ClaudiaC.; PESSAN, Luiz L. Antonio. Hierarchical levels of organization of the Brazil nut meso-carp. *Scientific Reports*, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 1-13, 2020.

SPECK, Thomas T. *et al.* Biomechanics and functional morphology of plants – Inspiration for biomimetic materials and structures. *In: Plant biomechanics*. Springer, Cham, 2018. p. 399-433.

VANDEN BROECK, Fabricio. *El diseño de la naturaleza o de la naturaleza del diseño*. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, División de Ciencias y Artes para el Diseño, Departamento de Medio Ambiente, 2000.

YANG, Yang Y. *et al.* Recent progress in biomimetic additive manufacturing technology: from materials to functional structures. *Advanced Materials*, [S. l.], v. 30, n. 36, p. 1706539, 2018.

ZHANG, Wen W. *et al.* Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb. *International Journal of Impact Engineering*, [S. l.], v. 125, p. 163-172, 2019.