

Casca de *Citrus sinensis* como gerador de conceito para o desenvolvimento de estruturas bioinspiradas com propriedades de amortecimento e dissipação de energia

Citrus sinensis peel as a concept generator for the development of bioinspired structures with damping and energy dissipation properties

Antônio Roberto Miranda de Oliveira, Universidade Federal da Paraíba / Brasil
antonio.roberto83@gmail.com

Amilton José Vieira de Arruda, Universidade Federal de Pernambuco / Brasil
arruda.amilton@gmail.com

Carla Langella, Università degli Studi Federico II / Itália
carla.langella@unina.it

Resumo

A natureza tem sido uma fonte de inspiração ilimitada para cientistas em várias áreas do conhecimento, principalmente no design, para concepção de novos produtos e materiais. A biomimética implica a compreensão e aplicações de estratégias encontradas na natureza para desenvolvimento de novos produtos. No estudo do pericarpo da *Citrus*, por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), observou-se características estruturais e morfológicas que permitem a dissipação de grandes quantidades de energia durante o impacto do fruto contra superfícies rígidas. O objetivo desse estudo é desenvolver uma estrutura bioinspirada, baseada na geometria estrutural das células presentes no mesocarpo (albedo) que possuem características estruturais para absorção de impacto. A metodologia utilizada foi a *biomimicry thinking* e com abordagem *bottom-up*. Por meio da microtomografia computadorizada (Micro-TC) e fabricação digital foram possíveis: as análises de materiais, reconstrução tridimensional da estrutura bioinspirada e sua prototipação, em resina flexível, através de impressão 3D.

Palavras-chave: Biomimética, Design bioinspirado, Amortecimento, Microtomografia Computadorizada de raio-x, Fabricação Digital.

Abstract

Nature has been a source of unlimited inspiration for scientists in various fields of knowledge, especially in design, for conceiving new products and materials. Biomimetics involves the understanding and applications of strategies found in nature for the development of new products. In the study of Citrus pericarp, by means of scanning electron microscopy (SEM), structural and morphological features were observed that allow the dissipation of large amounts of energy during the impact of the fruit against hard surfaces. The objective of this study is to develop a bio-inspired structure, based on the structural geometry of the cells present in the mesocarp (albedo) that possess structural characteristics for impact absorption. The methodology used was biomimicry thinking with a bottom-up approach. Through Micro-CT and digital fabrication it was possible: the material analysis, three-dimensional reconstruction of the bio-inspired structure and its prototyping, in flexible resin, using a 3D printer.

Keywords: Biomimetics, Bioinspired design, Damping, x-ray Micro-Computed Tomography, Digital Fabrication.



Introdução

A natureza tem sido uma fonte de inspiração em várias áreas do conhecimento, para o desenvolvimento de novos métodos de investigação científica. Dessa maneira, os materiais naturais oferecem novos insights para explorar, projetar, sintetizar e fabricar novos produtos (ZHANG, 2019). Materiais naturais com estruturas hierárquicas ou gradientes têm sido cada vez mais estudados por contribuir com propriedades mecânicas em aplicações na engenharia, arquitetura e design. Ao longo de bilhões de anos de seleção natural, as entidades biológicas evoluíram para se adaptar a seus ambientes vivos e complexos (BENYUS, 2002). Como resultado, a natureza vem desenvolvendo novas estratégias com estruturas naturais ao longo do tempo, que ainda estão em constante adaptação e mudança para fornecer soluções altamente eficientes para desempenhar várias funções em seu ambiente natural, fazendo melhor uso do material utilizado e da eficiência da função realizada (SAN HA et al., 2019); (SPECK et al., 2018).

As paredes de frutas, assim como cascas e sementes, desempenham uma variedade de funções. Uma dessas estratégias biológicas essenciais é: a proteção direta ou indireta das sementes contra danos mecânicos ou outros impactos ambientais prejudiciais. Isso qualifica tais estruturas biológicas como modelos para a criação de novos materiais e componentes que protegem mercadorias e/ou pessoas de danos induzidos por impactos de manuseio severo ou colisões contra superfícies mais rígidas (BÜHRIG-POLACZEK et al., 2016).

Explorar a morfologia e anatomia das frutas significa observar como a vida envolve, protege, contém, preserva, transporta e comunica suas estratégias na natureza (GRIJALVA, 2018). Dessa forma, o estudo busca trazer à luz as implicações e abstrações, da estrutura celular, por meio de estudo biomimético, do pericarpo de *Citrus sinensis*. Com isso, desenvolver uma estrutura bioinspirada com características de amortecimento para absorção de impacto. Essas estruturas com propriedades de amortecimento são exploradas para os problemas modernos industriais para desenvolvimento de novos produtos e materiais bioinspirados (SANCHEZ et al., 2015).

A *Citrus sinensis*, conhecida como laranja bahia ou laranja doce, é nativa de clima tropical, de forma arredondada ou ovalada, de coloração laranja, às vezes, avermelhada. A laranjeira possui entre 6 a 10 m de altura com copa densa e esférica. Os frutos têm peso médio de 60g, são uma fonte importante para as indústrias da alimentação, melífera e medicinal (FREE, 1993). São populares tanto em seu estado natural, quanto como os sucos. Suas cascas fornecem também os óleos essenciais e aromáticos encontrados nas flores, folhas, botões e são empregados na indústria farmacêutica e produção de perfumes. As flores e folhas de laranjeira são utilizadas como sedativo do sistema nervoso na medicina tradicional (ALZUGARAY, 1988).

Algumas cascas de frutas, assim como as cascas das árvores têm excelente tolerância contra danos mecânicos. No caso dos frutos, a estrutura externa (exocarpo) protege as porções internas (Mesocarpo) e mais internas contendo as sementes e polpa do fruto (endocarpo) que são essenciais para a germinação, reprodução e propagação do impacto e rachaduras quando o fruto cai no chão após ser derramado. No caso de troncos de árvores e caules de cipós, os tecidos vivos necessários para processos fisiológicos cruciais, como o crescimento secundário, são protegidos contra quedas de rochas (certas árvores alpinas) ou impacto sobre as plantas hospedeiras por uma casca grossa, muitas vezes esponjosa (VAN BREUGEL; KOLEVA; VAN BEEK, 2018).

A observação de microestruturas celulares incentiva a criação de materiais e estruturas inovadoras no desenvolvimento de novos produtos. A caracterização das microestruturas, a nível celular, e propriedades mecânicas desses materiais naturais podem auxiliar no entendimento das características relacionadas à morfologia e aconselhar a otimização estrutural em projetos de design industrial. As cascas do pomelo (*Citrus maxima*), que possuem uma microestrutura hierárquica do tipo espuma, são um bom paradigma para a produção de materiais com alta eficiência de absorção de energia, leveza e amortecimento, entre esses materiais celulares naturais. Isso, foi evidenciado nos estudos de: (FISCHER et al. 2013); (LI et al., 2019); (LOOYRACH et al., 2015); (ORTIZ et al., 2018); (SCHÄFER et al., 2020); (SEIDEL et al., 2010); (THIELEN et al., 2013); (WANG et al., 2019).

Do mesmo modo, Thielen et al., (2013) tiveram como objetivo de estudo identificar a tensão inicial de densificação da casca do pomelo e investigar a relação estrutura-função da casca do ponto de vista mecânico. Especialmente com referência aos feixes vasculares que penetram no tecido parenquimatoso da casca. Verificou-se que os feixes vasculares infiltram o ramo de casca de forma bastante consistente e funcionam como fatores de enrijecimento, ligando localmente as células parenquimatosas. Este estudo faz parte de um esforço de criar espumas metálicas fundidas reforçadas com fibra, para dissipação de energia em sistemas de proteção contra impactos.

Looyrach et al., (2015) estudaram o pomelo para o desenvolvimento de espuma de embalagem ecológica a partir da sua casca. Foram investigadas as propriedades físicas e mecânicas. Com isso, constatou-se que a microestrutura da casca se assemelhava a espuma de células abertas com propriedades mecânicas. Os resultados mostraram que as curvas de tensão-deformação não apresentaram região de platô diferente das espumas sintéticas. O estudo indicou propriedades mecânicas muito promissoras para uma espuma bioinspirada e desenvolvimento de uma embalagem ecologicamente correta.

Dessa forma, classificamos as frutas, por suas características, como verdadeiras embalagens naturais, por analogia funcional-estrutural em comparação a alguns aspectos presentes nas embalagens industriais. A seguir, são pontuadas algumas estratégias-funcionalidades presentes nas frutas que reforçam esse entendimento:

- proteção/resistência contra choques mecânicos – estudo das estruturas presentes no pericarpo para desenvolvimento de estruturas leves e de amortecimento contra impactos mecânicos; (ANTREICH et al., 2019); (BÜHRIG-POLACZEK et al., 2016);
- Empilhamentos e volume – com a distribuição das sementes para um melhor aproveitamento de espaço interno e armazenamento (BROECK, 2018);
- Desenvolvimento de novos materiais – economia circular com a reutilização das cascas (desenvolvimento de produtos e design sustentável) assim como os resíduos, que não podem passar por processo de reciclagem, podem ser reintegrados na natureza, através da compostagem orgânica, uma vez que transforma cascas de frutas em adubo (CASTRO, 2021);
- Estudos de comunicação – as frutas comunicam na natureza por via das cores (estado de maturação) (BROECK, 2018); (GRIJALVA, 2018);

- Cor estrutural (sem presença de pigmentos, muito explorado no reino animal como na borboleta *Morpho* azul), geralmente, para atrair animais que são vetores para dispersão das sementes – existem diversas formas de dispersão em que cobrindo áreas maiores garante-se uma maior distribuição e distância com a “planta-mãe” evitando-se competição entre elas (ELLISON, 2013); (GHIRADELLA, 2010). Um exemplo notável de forte coloração iridescente baseada em multicamadas em plantas, é o fruto de *Pollia condensata* (VIGNOLINI et al., 2012).

Dessa forma, uma das principais questões na transferência tecnológica contida na natureza para o mundo técnico será a entrega de qualidade dos materiais biológicos e orgânicos em materiais, como ligas metálicas fundidas, materiais compósitos reforçados com fibra, de metal, vidro, resinas, cerâmica ou polímeros. As aplicações potenciais para as estruturas biomiméticas resistentes ao impacto incluem recipientes para o transporte de produtos perigosos, como explosivos ou ácido fluorídrico, capacetes e outras roupas de proteção, proteção contra impactos de veículos e proteção contra meteoritos de estações espaciais (SEIDEL et al., 2010).

Nesse sentido, um dos grandes avanços da ciência dos materiais, hoje, é dado pela inspiração da observação da natureza e de suas estratégias. Essa inspiração permite o desenvolvimento de novos materiais com propriedades estruturais aprimoradas, aplicáveis em diversos campos – incluindo produtos de consumo, automotivo – com a alta capacidade de desempenho, que foram aprimoradas ao longo de milhões de anos (FLORES-JOHNSON, 2018).

Métodos e Abordagens

O conceito de Biomimética foi apresentado em quatro etapas (fig.1) do processo de design por Roland (2017). Existe um caminho específico da biologia ao design que começa com uma inspiração do campo da biologia e permite traçar o diagrama de forma sequencial baseada em problemas (fig. 2). Este processo é caracterizado por uma entidade biológica pesquisada, e suas táticas são documentadas. Uma abordagem de implementação é utilizada para sugerir uma solução de design baseada na compreensão de seus princípios biológicos.

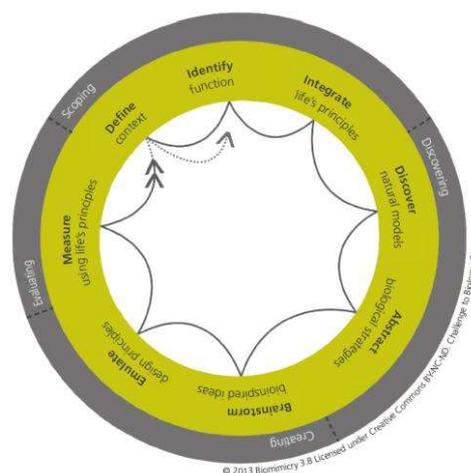


Figura 1: Diagram Biomimicry Thinking – Challenge to Biology – Biomimicry DesignLens. Fonte: Biomimicry Institute 3.8 (2015).

As etapas do diagrama que compõem o *Biomimicry thinking* identificam as quatro fases para este estudo. O Pensamento Biomimético consiste em quatro áreas nas quais o processo é desenvolvido: escopo, descoberta, criação e avaliação. Seguindo os passos do método *Biology for Design* e suas etapas específicas que integram as estratégias e princípios da vida na área do design bioinspirado. O diagrama é composto por quatro campos principais (ROLAND, 2017).

A realização das medidas a tomar, na fig. 1, não é fixa. O *Biomimicry Institute* apresenta dois cenários: *top-down* e *bottom-up*. Em que podem ocorrer de forma linear permitindo percorrer as etapas sequencialmente (fig.2). A abordagem definida para esse estudo foi a baseada no método *bottom-up* – procedimento definido em que uma entidade biológica é investigada inicialmente, mapeando suas estratégias e propondo uma solução de projeto baseada no conhecimento de seus princípios biológicos. Nesse caso, pelas características presentes e por fácil disponibilidade do fruto, a *Citrus sinensis*, foi o fruto selecionado como ente biológico para desenvolver uma estrutura bioinspirada para uma problemática de design – que consiste em desenvolver uma estrutura bioinspirada para absorção de impacto/dissipação de energia. Na fig. 2 pode-se ver as etapas metodológicas seguidas nesse estudo para desenvolvimento de produtos bioinspirados:



Figura 2: Processo de design. Fonte: (Autores).

- **Escopo:** Nessa fase foi realizada uma pesquisa exploratória seguida de uma revisão de literatura para identificar as frutas para estudos primários, para a Fase 01 (Pesquisa biológica). Por meio da revisão sistemática da literatura, de acordo com a metodologia de Conforto (2011) que inclui todas as pesquisas revisadas por pares e relevantes ao objetivo de garantir uma busca abrangente de pesquisa. Três bases de dados de pesquisa foram identificadas: (I) *web of Science*, (II) *Scopus* e (III) *Science Direct*. Apenas estudos empíricos primários foram incluídos, total de 91 estudos avaliados e 21 estudos foram selecionados. A revisão identificou vários estudos em que as frutas geram conceitos para melhorias ou resolução de problemas tecnológicos, analisando, abstraído, adaptando e transpondo princípios biológicos para aperfeiçoamento de estruturas artificiais esse estudo pode ser evidenciado em (OLIVEIRA; ARRUDA; LANGELLA, 2021).
- **Descobrimdo:** Fez-se um estudo mais detalhado da anatomia vegetal do MEV. Para isso utilizou-se a técnica da crio-fratura e as secções das amostras vegetais foram realizadas utilizando o criostato Leica CM 1850® para preservação a baixa temperatura. O instrumento foi projetado para congelamento rápido e para corte de amostras de tecido. Os fragmentos foram seccionados em 50 micrômetros com orientação do corte longitudinal, correspondente a Fase 02 (Anatomia e Morfologia Funcional).

As imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), fig. 4, foram realizadas, no centro de microscopia eletrônica da ESALQ (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, São Paulo). O trabalho foi executado com a participação do pesquisador, Dr. João Paulo Marques, para preparação das amostras, assim como manuseio técnico do equipamento – Microscópio Eletrônico de Varredura, JSM-IT300. O pericarpo da *Citrus* é anatomicamente dividido em três camadas distintas, conforme a fig. 3, (exocarpo, mesocarpo e endocarpo). No entanto, o endocarpo ou polpa, não foi representado nas imagens de microscopia eletrônica, fig.4, por não corresponder a área de interesse desse estudo. O Flavedo ou exocarpo (Ex) é evidenciado na parte mais externa, que inclui a cutícula (Cu), a epiderme e a hipoderme que contêm as glândulas de óleo que apresenta número e tamanho variáveis de acordo com a espécie e a variedade cítrica.

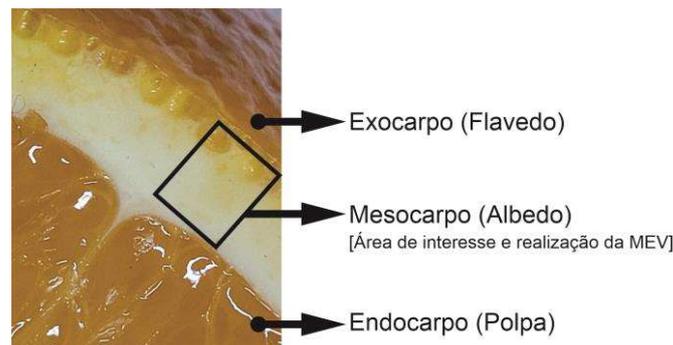


Figura 3: Pericarpo da *Citrus sinensis*. Fonte: Autores

(a)

(b)

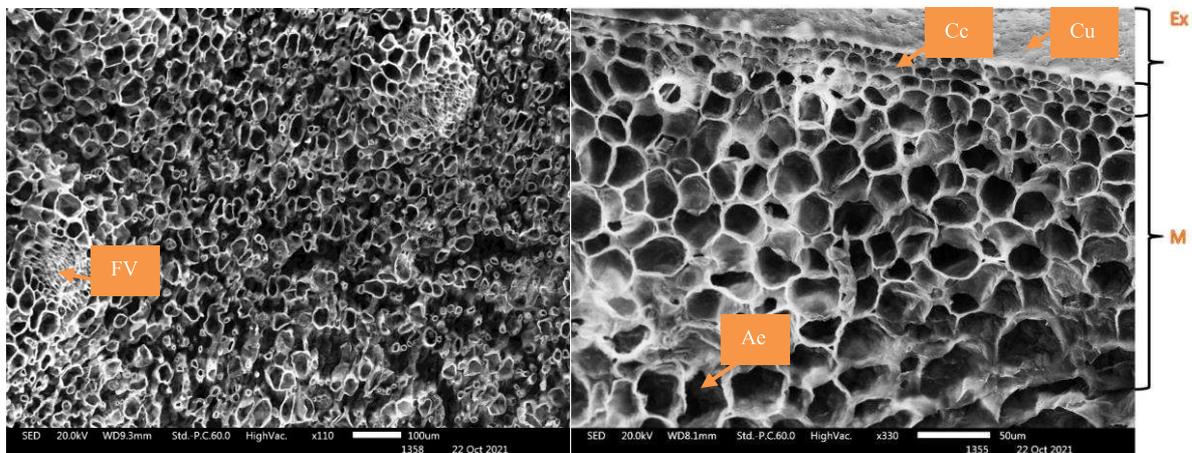


Figura 4: MEV – Exocarpo e mesocarpo da Citrus. Fonte: Autores em colaboração com ESALQ.

Na parte mais interna da casca, denomina-se albedo ou mesocarpo (M), fig. 4a. (Cc) células compactadas. (Cp) células parenquimáticas, fig. 4b. (FV) feixes vasculares que corresponde é um dos elementos que constituem o sistema de transporte das plantas vasculares. (Ae) Aerênquima é uma especialização do tecido parenquimático em que se desenvolvem grandes espaços intercelulares preenchidos por gases, geralmente interligados, formando uma estrutura contínua que se ramifica por todo o tecido (MAUSETH, 1988).

- **Criando:** Após o estudo da anatomia vegetal e identificação da área de interesse (estrutura presente no albedo, localizado no mesocarpo médio). A seleção da área de interesse se deu por conta das características presentes nas células do parênquima esponjoso nessa região,

responsáveis pela deformação e absorção de impacto devido aos espaços lacunosos entre elas que permitem a compactação das estruturas celulares internas, quando submetidas a compressão ou esmagamento. Após a identificação dessas estruturas por meio da MEV, iniciou-se a fase 03 (Compreender os princípios e estratégias). Nessa etapa da pesquisa foi desenvolvida em colaboração acadêmica com o DEN-UFPE (Departamento de Energia Nuclear). Utilizou-se o XT H 225 ST (fig. 5a), (fig.5b) em que temos o canhão de escaneamento de elétrons e a fixação do material para escaneamento para a captura das imagens de Microtomografia Computadorizada de raio-x (Micro-TC). Dessa maneira, obtém-se a medição detalhadas de componentes internos que são necessários para os recursos de reconstrução tridimensional, análise de falhas e pesquisa de materiais por meio do software VGStudio Max.

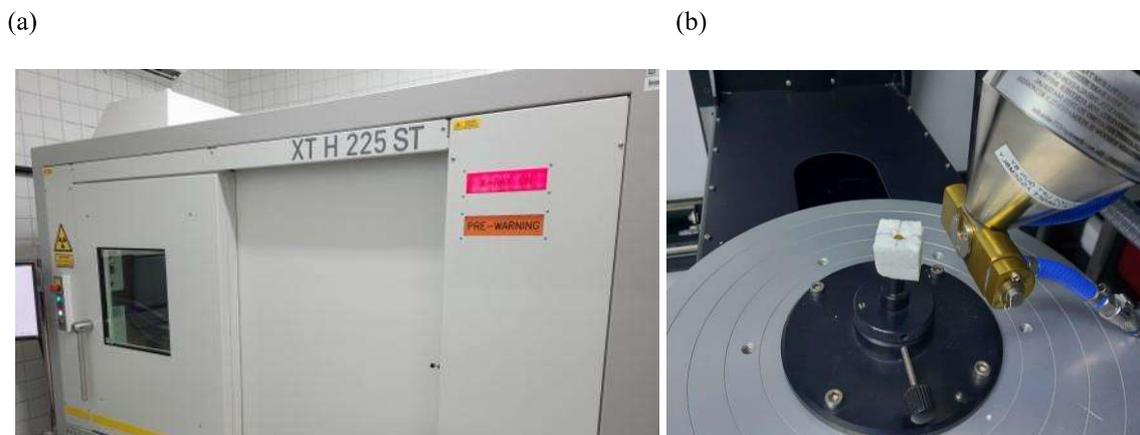


Figura 5: (a) XT H 225 ST. (b) Preparação da amostra para escaneamento Fonte: Autores

A Microtomografia computadorizada de raio-x, também é usada para obter uma visão interna de um modo não invasivo, observando a estrutura interna. No entanto, para esse estudo realizou-se a secção de uma parte da casca da laranja (fig. 6c) para uma melhor resolução e reconhecimento do software. Desse modo, o uso do recurso do Micro-TC foi qualificado para quantificar qualquer dimensão interna ou externa do mesocarpo da *Citrus*. Na fig. 6, (a) amostra da *Citrus*, (b) a área seccionada e (c) a secção do pericarpo selecionado para o escaneamento.

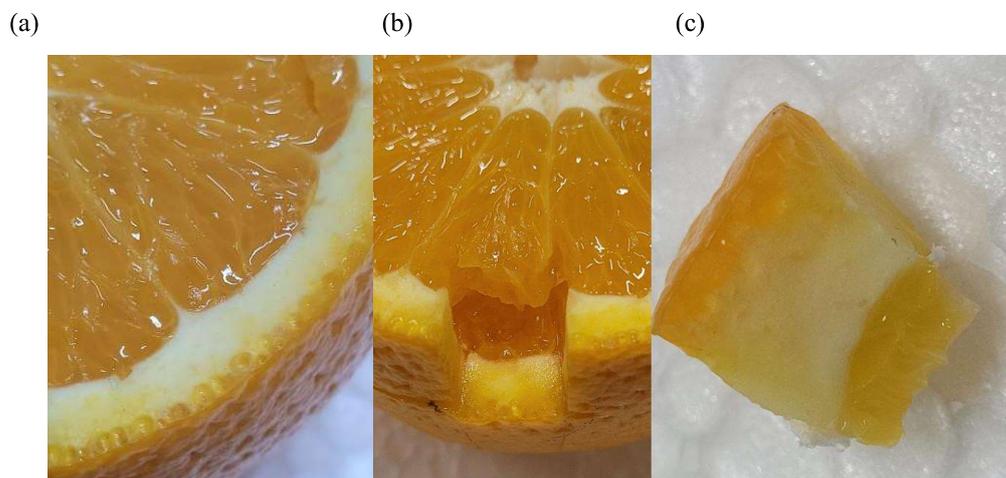


Figura 6: (a) Citrus. (b) Remoção da área de interesse. (c) Amostra de Citrus 5X5mm *in natura*. Fonte: Autores.

Após a etapa de escaneamento, gerou-se 3017 imagens de tomografia e dessa forma foi possível fazer a imagem tridimensional reconstruída (reconstrução TC), correspondente a Fase 04 (Abstração do modelo biológico). Na reconstrução 3D, imagens de raio-x 2D são tiradas de diferentes ângulos e são combinadas para criar um conjunto de dados 3D. A Tensão utilizada foi de 60kV, Corrente de 200 μ A e tamanho do pixel 10 μ m. A determinação da superfície e dos materiais foi realizada com auxílio do software VGStudio Max, em que foi criada uma área de interesse (RoI), já observada, nas imagens MEV. A região fica localizada no mesocarpo médio que corresponde a parte branca do pericarpo, chamada de albedo. O escaneamento foi feito no fruto inteiro e também em um pedaço conforme a figura 5, de 5x5 mm, para ampliação do tamanho do pixel e assim uma maior resolução da reconstrução TC pelo tamanho do voxel.

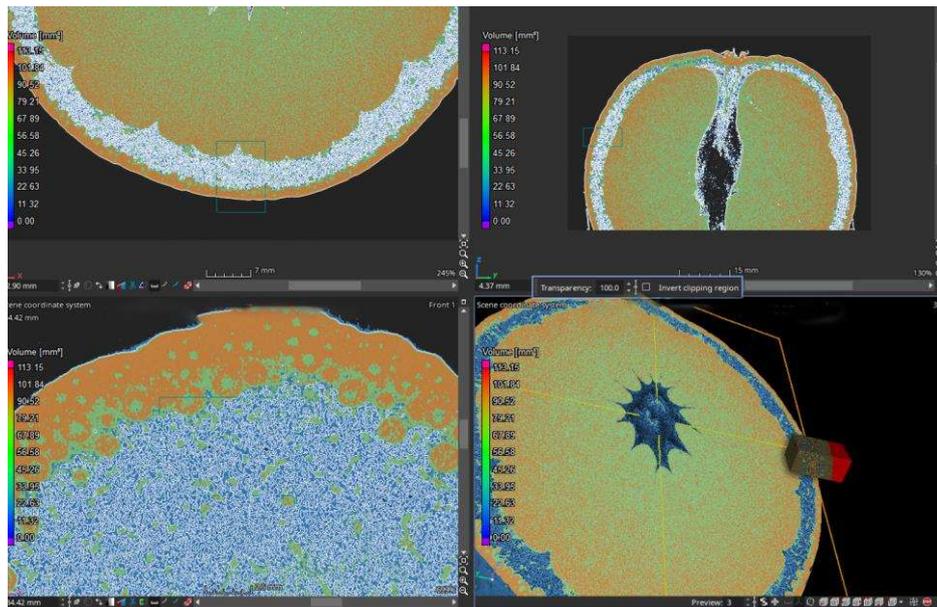


Figura 7: Análise das propriedades do material projetado. Fonte: autor

Com a determinação de superfície foi possível separar as áreas de interesses (suface determination), conforme a fig.8a, em que o software realiza uma separação de materiais por meio algorítmico (fig. 8b), e gera uma malha tridimensional de superfície (suface mesh). Após a criação da *mesh* (fig. 9a), foi possível exportar para formatos de leitura de softwares de modelagem poligonal como o 3ds Max e fusion 360.

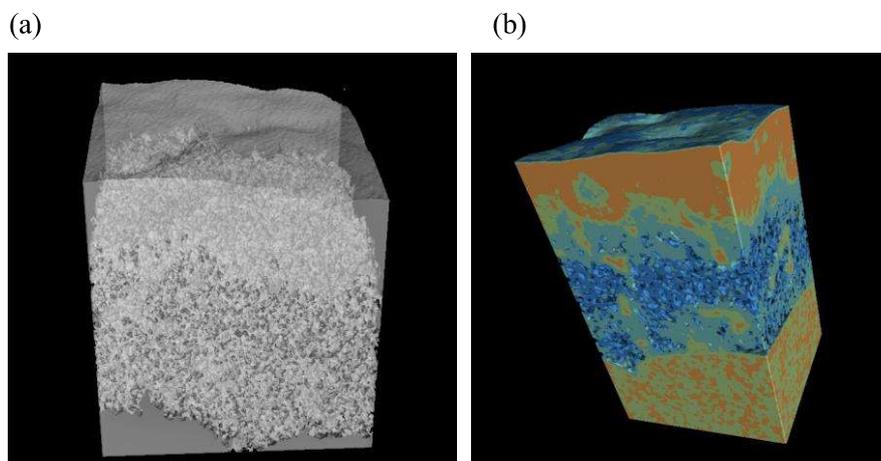


Figura 8: (a) Seleção da mesh da área de interesse. (b) Análise dos materiais. Fonte: autores.

Abaixo, na fig. 9a, observa-se um recorte espacial, em formato cúbico, para delimitação da área de interesse que apresenta uma hierarquia estrutural e espaços entre as células que tem como estratégia a absorção de energia. Na fig. 9b, tem-se uma análise de porosidade da estrutura de onde foi retirada a *mesh*, que corresponde a aproximadamente 44% de porosidade obtida por meio da *3D Porosity Analysis* que reconhece e caracteriza a porosidade em três dimensões. Evidenciando grandes espaços lacunosos que permitem uma reconfiguração das estruturas quando submetidas a compressão e leveza, visto que se trata de uma estrutura com porosidades.

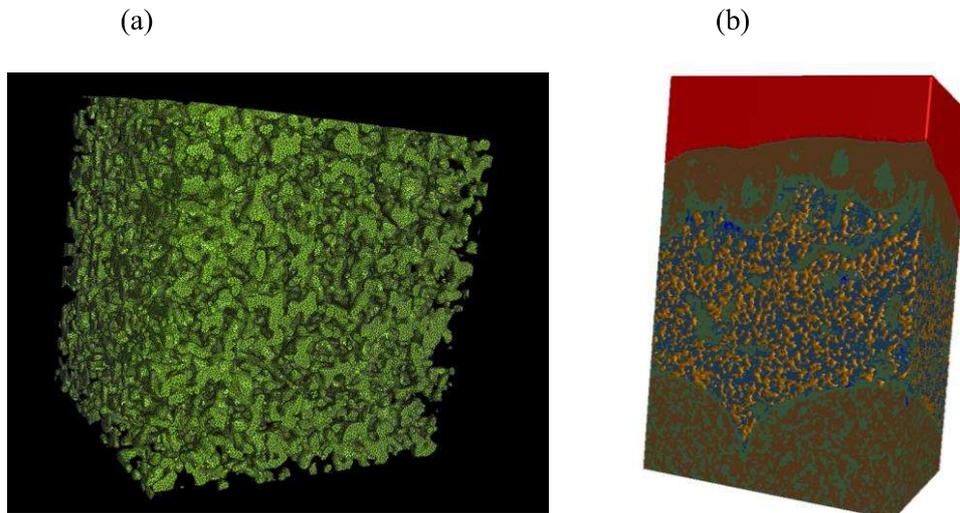


Figura 9: (a) Volume mesh. (b) Análise de porosidade da área de interesse. Fonte: autores.

Os parâmetros detalhados sobre tamanho, forma e número de discontinuidades permitem diferenciar entre os poros da estrutura. Os resultados podem ser combinados e analisados com a espessura de parede do componente existente de um modo não invasivo por meio do software.

Resultados e discussões

A biomimética implica a compreensão de estruturas, processos biológicos, suas aplicações, bem como métodos ou procedimentos tecnológicos comparáveis. Essa atividade se baseia no princípio de que, na Terra, todo organismo vivo é o resultado de milhões de anos de evolução. 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 dentro dos sistemas naturais, que podem ser usados como modelos na ciência e na engenharia de novos materiais (BÜHRIG-POLACZEK et al., 2016).

Ao combinar a técnica de imagem microtomografia de raio-x e fabricação digital é possível desenvolver artefatos, através das técnicas de prototipação rápida. Dessa forma, foi possível a prototipação de uma estrutura abstraída mediante a observação de um ente natural. Após a impressão da estrutura, com o modelo físico, observou-se uma melhor relação de compactação da estrutura para absorção de energia sob tensão, no sentido axial (exocarpo para o mesocarpo). Quando tensionada também foi verificada a presença de energia elástica na estrutura com propriedades de absorção de energia, evidenciados na fig.11.

Por intermédio da impressão 3D em resina flexível, com a impressora Creality Ld 002h, obteve-se a prototipação rápida da estrutura bioinspirada, Fig. 10a, abstraída do albedo da laranja que corresponde a Fase 05 (Implementação técnica). Foi utilizado fatiador Chitubox, com tempo de impressão de aproximadamente de 2h, primeiramente, a mesh exportada do VGStudio Max era de formato (.STL) e depois que é fatiado torna-se um (CTB). A resina flexível foi escolhida por possuir boa fluidez, facilidade de Processamento, baixa contração, boas propriedades dielétricas com isolamento e resistência química elevada e a umidade.

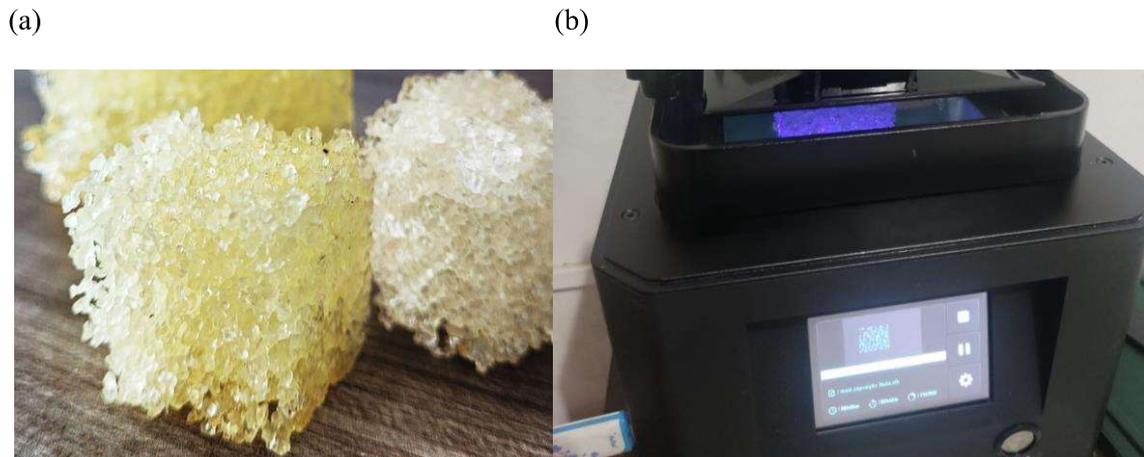


Figura 10: (a) Impressão em resina flexível da estrutura bioinspirada. (b) impressora Fonte: autores.

Neste estudo, as estratégias encontradas na natureza foram abstraídas e aplicadas para o desenvolvimento de uma nova solução biomimética otimizando a relação entre recursos de desempenho, transferência de conhecimento, princípios e lógicas para desenvolvimento de uma estrutura hierárquica para absorção de impacto, correspondente a fase 6 (solução de design). Na fig. 11a observou-se que a estrutura possui uma melhor tensão de compressão no sentido exocarpo > endocarpo com energia total absorvida na direção axial (da casca para o centro do fruto). Quando submetida a compressão, ela adquire um deslocamento e a energia potencial elástica, que é uma forma de energia que está relacionada à elasticidade e à deformação (figuras 11b e 11c).

(a) Estrutura bioinspirada (b) Tensão de compressão (c) Deslocamento

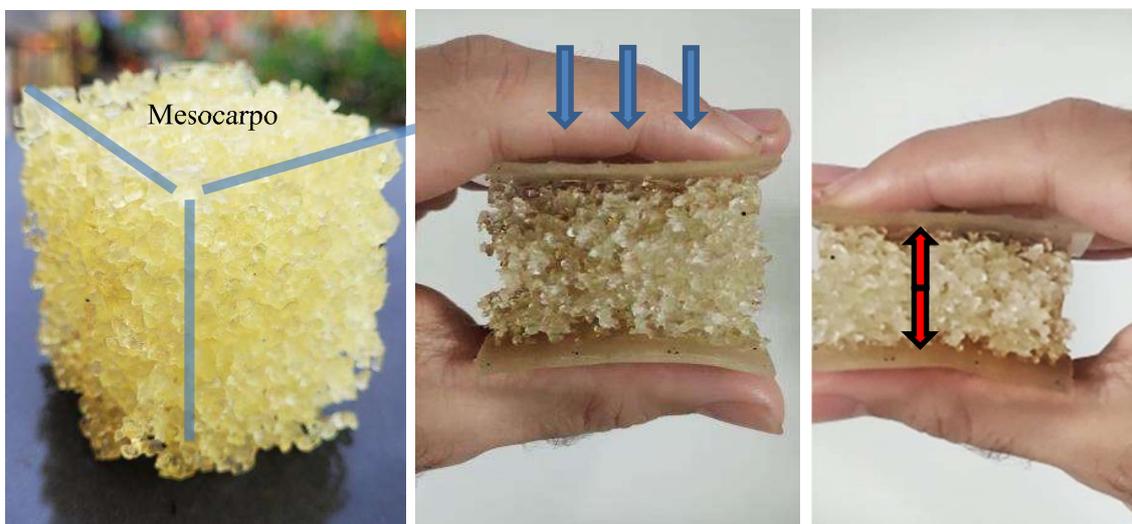


Figura 11: (a) Relação estrutura. (b) teste de compressão. (c) absorção de energia. Fonte: autores.

Através da biomimética é possível o desenvolvimento de novas soluções e estratégias abrindo novas perspectivas e oportunidades no campo do design, engenharia e biologia. Este estudo busca um importante processo de integração para a nova era industrial, ou seja, a quarta revolução industrial para a partir da inspiração natural se projetar para o mundo técnico. Com a observação da natureza e da realização de métodos específicos é possível fazer a abstração de estruturas funcionais para aplicação em problemas específicos, resultando em novos produtos. Os resultados alcançados são encorajadores e fornecem um paradigma para pesquisas futuras para aplicação da estrutura bioinspirada projetada com características de amortecimento e leveza. A partir desse resultado, a seguir, são sugeridos alguns itens que podem ser investigados, incluindo para uma melhor análise da estrutura gerada:

- (a) Análise de elementos finitos (MEF) para simulação mecânica estrutural;
- (b) Prototipação e aplicação da estrutura em novos produtos;
- (c) Teste de colisão contra danos mecânicos;
- (d) Estudos de novas técnicas de replicação da estrutura bioinspirada por design paramétrico;
- (e) Utilização de outros materiais visando a sustentabilidade.

Referências

- ALZUGARAY, D. **Enciclopédia de plantas brasileiras**. Editora três, 1988.
- ANTREICH, S. J. et al. The puzzle of the walnut shell: a novel cell type with interlocked packing. **Advanced Science**, v. 6, n. 16, p. 1900644, 2019.
- BÜHRIG-POLACZEK, A. et al. Biomimetic cellular metals—using hierarchical structuring for energy absorption. **Bioinspiration & biomimetics**, v. 11, n. 4, p. 045002, 2016.
- CASTRO, J. C. N. **A economia circular no 1º ciclo do ensino básico? Educar para o ambiente e para a sustentabilidade**. 2021. Tese de Doutorado.
- ELLISON, M. S. **Engineered Biomimicry: Chapter 10. Biomimetic Textiles**. Elsevier Inc. Chapters, 2013.
- FISCHER, S. F. et al. Production and properties of a precision-cast bio-inspired composite. **Journal of Materials Science**, v. 49, n. 1, p. 43-51, 2014.
- FLORES-JOHNSON, E. A. et al. Microstructure and mechanical properties of hard *Acrocomia mexicana* fruit shell. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 1-12, 2018.
- FREE, J. et al. **Insect pollination of crops**. Academic press, 1993.
- GHIRADELLA, H. Insect cuticular surface modifications: scales and other structural formations. In: **Advances in insect physiology**. Academic Press, 2010. p. 135-180.
- GRIJALVA, S. F. **La naturaleza del embalaje: la naturaleza como fuente de innovación para empaques**. Caligrama, 2018.
- BENYUS, J.M. **Biomimicry**. Harper-Collins, New York, NY, USA, 2002
- LANGELLA, C. **Design & scienza**. List. 2019. ISBN 8832080079
- LI, T. et al. Bioinspired foam composites resembling pomelo peel: Structural design and compressive, bursting and cushioning properties. **Composites Part B: Engineering**, v. 172, p. 290-298, 2019.



- LOOYRACH, J. et al. Pomelo (*Citrus maxima*) peel-inspired property for development of eco-friendly loose-fill foam. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications Ltd, 2015. p. 279-283.
- OLIVEIRA, A. R. M.; ARRUDA, A. J. V; LANGELLA, C. 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**, n. 149, p. 189-206, 2021b.
- ORTIZ, J.; ZHANG, G.; MCADAMS, D. A. A model for the design of a pomelo peel bioinspired foam. **Journal of Mechanical Design**, v. 140, n. 11, p. 114501, 2018.
- ROWLAND, R. Biomimicry step-by-step. **Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials**, v. 6, n. 2, p. 102-112, 2017.
- SAN HA, N. et al. Mechanical properties and energy absorption characteristics of tropical fruit durian (*Durio zibethinus*). **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 104, p. 103603, 2020.
- SANCHEZ, C.; ARRIBART, H.; GIRAUD GUILLE, M. Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems. **Nature materials**, v. 4, n. 4, p. 277-288, 2005.
- SCHÄFER, I. et al. Modelling the damping response of biomimetic foams based on pomelo fruit. **Computational Materials Science**, 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**, p. 421-430, 2010.
- SONEGO, M.; FLECK, C.; PESSAN, Luiz Antonio. Hierarchical levels of organization of the Brazil nut mesocarp. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-13, 2020.
- SPECK, T. et al. Biomechanics and functional morphology of plants – Inspiration for biomimetic materials and structures. In: **Plant biomechanics**. Springer, Cham, 2018. p. 399-433.
- THIELEN, M. et al. Structure–function relationship of the foam-like pomelo peel (*Citrus maxima*) – an inspiration for the development of biomimetic damping materials with high energy dissipation. **Bioinspiration & biomimetics**, v. 8, n. 2, p. 025001, 2013.
- VAN BREUGEL, K.; KOLEVA, D.i; VAN BEEK, T.. **Ageing of Materials and Structures**. Springer, 2018.
- VANDEN BROECK, F. **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, 2018.
- VIGNOLINI, S. et al. Pointillist structural color in Pollia fruit. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 39, p. 15712-15715, 2012.
- W WANG, B.; PAN, B.; LUBINEAU, G. Morphological evolution and internal strain mapping of pomelo peel using X-ray computed tomography and digital volume correlation. **Materials & Design**, v. 137, p. 305-315, 2018.
- WANG, H. et al. Expanded vermiculite-filled polyurethane foam-core bionic composites: preparation and thermal, compression, and dynamic cushion properties. **Polymers**, v. 11, n. 6, p. 1028, 2019.
- YANG, Y. et al. Recent progress in biomimetic additive manufacturing technology: from materials to functional structures. **Advanced Materials**, v. 30, n. 36, p. 1706539, 2018.
- ZHAO, N. et al. Bioinspired materials: from low to high dimensional structure. **Advanced Materials**, v. 26, n. 41, p. 6994-7017, 2014.

Sobre os autores

Antônio Roberto Miranda de Oliveira

Graduado em design, possui mestrado em Design com foco em gestão do design e design estratégico. Atualmente é doutorando na linha de pesquisa – Biomimética – pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE/ Recife, Brasil) com ênfase em design de produtos bioinspirados. Atualmente é professor substituto do departamento de design da Universidade Federal da Paraíba (UFPB, Rio Tinto, Brasil). Onde leciona, na graduação em design. Pesquisador/colaborador do Biodesign e Artefatos Industriais da UFPE.

ORCID. <https://orcid.org/0000-0003-2703-0499>

75

Amilton José Vieira de Arruda

Amilton José Vieira de Arruda. Graduação em Projeto de Produto Design Industrial pela UFPE (1982), Mestrado em Design e Biônica pelo IED em Milão (1992), doutorado em Pesquisa em Desenho Industrial - Ph.D pela Universidade Politécnica de Milão (2002) e pós-doutorado em Design e Biônica pela IADE *European University* UNIDCOM Lisboa (2018/2019). Desde 1985 professor do Curso de Design da UFPE. Atualmente é professor associado IV. Coordena o Grupo de Pesquisa em Biodesign e Artefatos Industriais da UFPE.

ORCID. <https://orcid.org/0000-0003-4551-4497>

Carla Langella

Arquiteta, Professora no *Dipartimento di architettura dell'Università degli Studi Federico II*. Área de estudo focada na aplicação de estratégias biomiméticas e bioinspiradas ao projeto de design através da experimentação da abordagem " Hybrid Design". No campo da pesquisa em design experimental, investiga as oportunidades de construir caminhos híbridos que envolvam as contribuições científicas mais avançadas no projeto de design para aproximar a ciência contemporânea da vida das pessoas.

ORCID. <https://orcid.org/0000-0002-4346-656X>