



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE ARTES E COMUNICAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

ANTÔNIO ROBERTO MIRANDA DE OLIVEIRA

**ESTUDO BIOMIMÉTICO DE ESTRUTURAS NATURAIS PRESENTES NAS
FRUTAS TROPICAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE
DESIGN BIOINSPIRADOS**

Recife
2022

ANTÔNIO ROBERTO MIRANDA DE OLIVEIRA

**ESTUDO BIOMIMÉTICO DE ESTRUTURAS NATURAIS PRESENTES NAS
FRUTAS TROPICAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE
DESIGN BIOINSPIRADOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Design.

Área de concentração: Planejamento e Contextualização de Artefatos.

Orientador: Prof. PhD. Amilton José Vieira de Arruda

Coorientadora: Prof.^a PhD. Carla Langella

Recife
2022

O48e Oliveira, Antônio Roberto Miranda de
Estudo biomimético de estruturas naturais presentes nas frutas tropicais para o desenvolvimento de projetos de design bioinspirados/ Antônio Roberto Miranda de Oliveira. – Recife, 2022.
170f.: il., fig., tab.

Sob orientação de Amilton José Vieira de Arruda.
Sob coorientação de Carla Langella.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Artes e Comunicação. Programa de Pós-Graduação em Design, 2022.

Inclui referências.

1. Planejamento e Contextualização de Artefatos. 2. Biomimética; Bioinspiração. 3. Embalagens naturais. 4. Fruta. 5. Amortecimento. 6. Anatomia vegetal. I. Arruda, Amilton José Vieira de (Orientação). II. Título.

745.2 CDD (22. ed.) UFPE (CAC 2022-175)

ANTÔNIO ROBERTO MIRANDA DE OLIVEIRA

**ESTUDO BIOMIMÉTICO DE ESTRUTURAS NATURAIS PRESENTES NAS
FRUTAS TROPICAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE
DESIGN BIOINSPIRADOS**

Tese apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Design da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para a obtenção
do título de Doutor em Design.

Aprovada em: 01/09/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ney de Brito Dantas (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Prof. Dr. Adailton Laporte de Alencar (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Prof. Dr^a. Emília Cristina Pereira de Arruda (Examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Prof. Dr. Itamar Ferreira da Silva (Examinador externo)
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof. Dr. Washington Ferreira Silva (Examinador externo)
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Com muito amor a toda minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao PPGDesign na UFPE e demais professores que contribuíram de alguma forma para realização desta pesquisa. Agradeço, ao professor **Amilton José Vieira de Arruda** que proporcionou caminhos e possibilidades para a realização dessa conquista ao longo de todos esses anos. Agradeço à professora **Carla Langella**, por todas orientações e conselhos para a realização das atividades. Agradeço por todo ensinamento e disponibilidade da professora **Emília Arruda**. Agradeço a compreensão da minha família e a Deus, por passar por momentos tão difíceis enfrentados, principalmente, por conta da pandemia proporcionada pela covid-19. Agradeço a minha mãe, **Célia Miranda**, por toda ajuda e também por ser minha maior inspiração para seguir na docência. A minha esposa, **Priscila Cláudia**, pela motivação e as ajudas diárias. Aos meus irmãos, **Marcus, Julianne e Rodolfo**. Aos meus filhos, **Roberto Miguel e Anna Rita** por toda a compreensão e por entender que alguns momentos precisei me ausentar para desenvolver esse trabalho e abrir mão de momentos de lazer em família. Portanto, meu muito obrigado a todos que fazem parte da minha vida e que de uma certa maneira contribuíram para a realização desse sonho tão importante para mim. Muito obrigado a todos!

RESUMO

Na natureza, encontra-se uma infinidade de estruturas biológicas que desempenham a função de proteção e resistência mecânica. As cascas das frutas apresentam-se como verdadeiras embalagens naturais, visto que elas protegem, envolvem, armazenam e desempenham função de proteção. Nelas encontramos diversos arranjos celulares que vêm se desenvolvendo ao longo de milhões de anos para ter uma alta performance estrutural. A proteção direta e indireta contra danos mecânicos ou outras influências ambientais negativas nas frutas, envolvem resistência à colisão, amortecimento e dissipação de energia. A biomimética é descrita como a colaboração interdisciplinar entre o estudo da biologia e a tecnologia ou de outras disciplinas de inovação, como o design, com a finalidade de resolver desafios técnicos por meio do estudo das funções e estratégias encontradas nos sistemas biológicos. Esta pesquisa teve como objetivo estudar as disposições naturais celulares, encontradas nas frutas tropicais, para a abstração e prototipação de uma estrutura bioinspirada com propriedades de amortecimento e absorção de impacto. Como método de exploração inicial, a observação da microscopia óptica permitiu observar e identificar os tipos celulares presente no pericarpo e dessa maneira selecionar os frutos. Com auxílio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando o método da crio-fratura, observou-se a morfologia e anatomia vegetal. O uso da Microtomografia computadorizada (Micro-CT) para a observação estrutural por meio não invasivo, a análise de materiais e a reconstrução tridimensional, evidenciou a conformação celular tridimensional e tornou possível a abstração da estrutural natural. Como resultado, esse estudo traz a prototipação em 3D de uma estrutura natural bioinspirada com propriedades visíveis de amortecimento e compactação. A conclusão da pesquisa aponta para a potencialidade do designer de se comunicar com a biologia e com as ferramentas tecnológicas aprofundando o entendimento sobre a natureza e correlacionando princípios estruturais-funcionais biológicos com as necessidades humanas.

Palavras-chave: Biomimética; Bioinspiração; Embalagens naturais; Fruta; Amortecimento; Anatomia vegetal.

ABSTRACT

In nature, there is a multitude of biological structures that perform the function of protection and mechanical resistance. Fruit peels are true natural packaging, since they protect, wrap, store, and perform protective functions. In them we find several cellular arrangements that have been developed over millions of years to have a high structural performance. The direct and indirect protection against mechanical damage or other negative environmental influences in fruit involves collision resistance, cushioning, and energy dissipation. Biomimetics is described as the interdisciplinary collaboration between the study of biology and technology or other innovation disciplines, such as design, in order to solve technical challenges by studying the functions and strategies found in biological systems. This research aimed to study the natural cellular arrangements, found in tropical fruits, for the abstraction and prototyping of a bioinspired structure with cushioning and impact absorption properties. Through optical microscopy, it was possible to observe and identify the cell types, present in the pericarp, thus selecting the fruits, as a method of initial exploration. With the aid of Scanning Electron Microscopy (SEM), using the cryo-fracture method, the morphology and plant anatomy was observed. The use of Computerized Microtomography (Micro-CT), for structural observation by non-invasive means, material analysis and three-dimensional reconstruction, thereby evidencing the three-dimensional cellular conformation and making possible the abstraction of the natural structural. As a result, this study brings the 3D prototyping of a bioinspired natural structure with visible damping and compaction properties. The conclusion of the research points to the potential of the designer to communicate with biology and technological tools deepening the understanding of nature, correlating biological structural-functional principles with human needs.

Keywords: Biomimetics; Bioinspiration; Natural packaging; Fruit; Damping; Plant anatomy.

SOMMARIO

In natura, esiste un'infinità di strutture biologiche che svolgono le funzioni di protezione e resistenza meccanica. Le bucce dei frutti possono essere interpretate come imballaggi naturali visto che proteggono, avvolgono, isolano, conservano e talvolta svolgono funzioni comunicative. In queste strutture troviamo diverse disposizioni cellulari che si sono sviluppate nel corso di milioni di anni per ottenere un'elevata prestazione strutturale. La protezione diretta e indiretta contro i danni meccanici o altre influenze ambientali negative per i frutti, comporta la resistenza alle collisioni, l'ammortizzazione e la dissipazione di energia. La biomimetica è descritta come la collaborazione interdisciplinare tra la biologia e le discipline progettuali e tecnologiche, come il design e l'ingegneria, con la finalità di risolvere le sfide tecniche trasferendo in modo analogico le funzioni e le strategie presenti nei sistemi biologici. Questa ricerca si propone di studiare le disposizioni cellulari naturali, presenti nei frutti tropicali, per l'astrazione e la prototipazione di una struttura bioispirata con proprietà di ammortizzazione e assorbimento degli impatti. Attraverso l'osservazione della microscopia ottica, è stato possibile osservare e identificare i tipi di cellule, presenti nel pericarpo, selezionando così i frutti, come metodo di esplorazione iniziale. Con l'aiuto della microscopia elettronica a scansione (SEM), utilizzando il metodo della crio-frattura, sono state osservate la morfologia e l'anatomia della pianta. L'uso della microtomografia computerizzata (Micro-CT), per l'osservazione strutturale in modo non invasivo, l'analisi dei materiali e la ricostruzione tridimensionale, evidenzia la conformazione cellulare tridimensionale e rende possibile l'astrazione della struttura naturale. Come risultato, questo studio porta alla prototipazione 3D di una struttura naturale bioispirata con proprietà di smorzamento e compattazione visibili. La conclusione della ricerca punta alle potenzialità del designer è in grado di comunicare con la biologia e gli strumenti tecnologici approfondendo la comprensione della natura, correlando i principi strutturali-funzionali biologici con le necessità umane.

Parole chiave: Biomimetica; Bioispirazione; Imballaggio naturale; Frutta; Smorzamento; Anatomia vegetale.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Estrutura da tese.....	18
1.2	Justificativa e relevância da pesquisa.....	19
1.3	Problemática e Recorte do objeto de estudo.....	22
1.3.1	Objeto de estudo.....	22
1.3.2	Problemática.....	22
1.3.3	Recorte de pesquisa.....	24
1.4	Objetivos de investigação.....	24
1.4.1	Objetivo Geral.....	24
1.4.2	Objetivos Específicos.....	25
1.5	Pergunta e hipótese da pesquisa.....	25
1.5.1	Pergunta do problema.....	25
1.5.2	Hipótese.....	26
2	ESTADO DA ARTE.....	28
2.1	Conjunto teórico.....	28
2.2	Biomimética, princípios e contextualização.....	29
2.3	Bioinspiração.....	37
2.4	Design paramétrico.....	48
2.5	Embalagens naturais.....	51
2.5.1	Comunicação e Cor estrutural.....	53
2.5.2	Armazenamento, Geometria e Volume.....	57
2.5.3	Transporte.....	61
2.5.4	Proteção, Resistência e absorção contra choques mecânicos.....	63
2.5.4.1	Pomelo – <i>Citrus maxima</i>.....	64
2.5.4.2	Coco – <i>Cocos nucifera</i>.....	74
2.5.4.3	Macaíba – <i>Acrocomia mexicana</i>.....	76
2.5.4.4	Noz – <i>Juglans regia</i>	79
2.5.4.5	Noz-pecã – <i>Carya illinoensis</i>	79
2.5.4.6	Pistáchio – <i>Pistachio fandochi</i>	80
2.5.4.7	Nozes de faia – <i>Fagus sylvatica</i>	80
2.5.4.8	Castanha – <i>Bertholletia excels</i>	81
2.5.4.9	Avelã – <i>Bertholletia excels</i>	82

2.5.4.10	Amêndoa – <i>Prunus dulcis</i>	83
2.5.4.11	Macadâmia – <i>Macadamia integrifolia</i>	87
3	METODOLOGIA GERAL DA PESQUISA	93
3.1	Método de abordagem	93
3.2	Método de procedimento.....	94
3.3	Técnicas de pesquisa	95
3.3.1	Fase Exploratória	95
3.4	Etapas metodológicas/atividade/método e ferramentas	95
3.5	FASE 1 – Escopo.....	101
3.5.1	Revisão Bibliográfica Sistemática	101
3.5.2	Resultados da RBS.....	106
3.5.3	Pesquisa Ação	110
3.6	FASE 2 – Descobrimos.....	112
3.6.1	Laboratório de Anatomia Vegetal (LAVeg - UFPE)	112
3.6.2	Seleção dos entes biológicos	112
3.6.3	Microscopia Óptica Convencional	113
3.6.3.1	Cacau – <i>Theobroma cacao</i> L.	116
3.6.3.2	Maracujá – <i>Passiflora</i>	119
3.6.3.3	Fruta-pão - <i>Artocarpus altilis</i>	122
3.6.3.4	Pitaia - <i>Hylocereus polyrhizus</i>	124
3.6.4	Caracterização elemento natural.....	126
3.6.5	Anatomia Vegetal.....	127
3.6.6	Parênquima, Colênquima e Esclerênquima	127
3.6.7	Estrutura anatômica do fruto	129
3.6.8	MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)	130
3.6.9	Secção criostática (criofratura).....	132
3.6.10	Laranja - <i>Citrus sinensis</i>	133
3.6.11	Maracujá - <i>Passiflora edulis</i>	135
3.6.12	Cacau - <i>Theobroma</i>	138
3.6.13	Romã - <i>Punica granatum</i>	140
3.7	FASE 3 – Criando	142
3.7.2	Micro-CT (Microtomografia de raio -x).....	142
3.7.3	Reconstrução tridimensional	148
3.7.4	Determinação de superfície e materiais	150

3.7.5	Seleção da área de interesse (RoI).....	151
3.7.6	Volume <i>mesh</i>	152
3.8	FASE 4 – Avaliando	155
3.8.1	Análise de porosidade da estrutura.....	155
3.8.2	Prototipação da estrutura bioinspirada por fabricação digital	156
4	CONCLUSÃO	159
	REFERÊNCIAS	164

Parte I

1 INTRODUÇÃO

A Biomimética introduz uma metodologia baseada na transferência de conhecimento que busca aprender com a natureza estratégias que estão sendo aperfeiçoadas no decorrer de bilhões de anos. Por meio dessa observação, aprende-se novas maneiras como se cultivar os alimentos, fabricar novos materiais, aproveitar energia de forma mais eficiente, até como conduzir negócios. Com a Biomimética, fabrica-se da mesma forma que a natureza, produzindo estratégias de otimização baseadas na economia de recursos e na integração multifuncional. Dessa forma, a natureza fornece modelos com uma infinidade de estruturas e sistemas naturais que desempenham diversas funções das mais simples até as mais complexas (BENYUS, 1997).

Mediante a sua metodologia, busca-se basicamente resolver problemas tecnológicos com a observação, análise, adaptação e transposição de princípios biológicos, que evoluíram ao longo de anos, e são empregados como estratégias para resolução de problemas para o mundo técnico. Consequente que são introduzidos os artefatos bioinspirados (ARRUDA, 2002).

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, a biociência, a biomimética é uma disciplina que propõe a transferência da qualidade e funcionalidades biológicas para projetar artefatos. O estudo desses sistemas biológicos são uma resposta adequada aos respectivos desafios que se apresentam como problemas de Design. (ARRUDA et al., 2019; BHUSHAN, B., 2016; LAKHTAKIA, A.; MARTÍN-PALMA, R. J., 2013; LANGELLA, C., 2019; PRIMROSE, S.B., 2020; UFODIKE, C. et al., 2021).

Na natureza, geralmente, encontra-se sistemas simples ou multifuncionais que são associados a outros que, pelo fato de desempenharem diversas funções, são atribuídas diferentes tarefas. Como exemplo tem-se as frutas, que possuem diversas funcionalidades, tornando-se verdadeiras Embalagens Naturais que apresentam diversas estratégias. À vista disso, essa pesquisa focará em uma das suas principais funções, a de proteção. Nas frutas, encontram-se nas suas cascas e sementes, estratégias de proteção contra

danos mecânicos, radiação ultravioleta e estratégias que também podem atrair animais que são vetores para dispersão das sementes (ANTREICH et al., 2019; (BÜHRIG-POLACZEK et al., 2016; KAUPP et al., 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-se aos seguintes problemas de pesquisa: Os sistemas estruturais presentes nos frutos tropicais responsáveis pela proteção durante a queda, podem ser utilizados como referência no desenvolvimento de estruturas bioinspiradas?

A cebola, o milho, o pomelo, as nozes como embalagens que encontramos na natureza e o que elas nos ensinam, o que podemos abstrair de suas estruturas que foram desenvolvidas para ter o máximo de desempenho com o mínimo material disponível? Ou, o que podemos aprender com essas estruturas naturais, já que todos os seus projetos são totalmente biodegradáveis e que suas estruturas foram desenvolvidas para tarefas específicas (ARRUDA, A., 2018; BROECK, 2018; GRIJALVA, 2018).

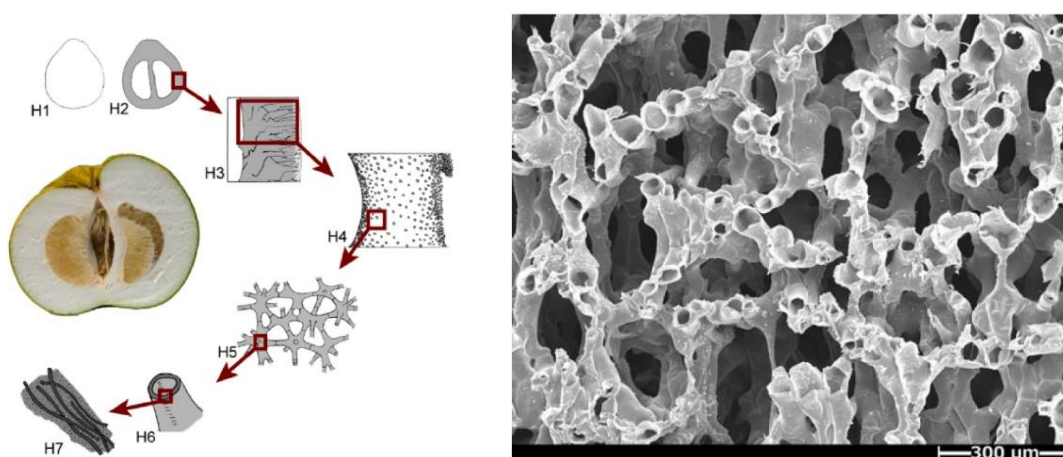
Nas embalagens naturais são encontradas inúmeras funções e uma delas é o desempenho de proteção, resistência a colisões, choques mecânicos, presentes nas paredes das frutas, bem como nas cascas e sementes (BROECK, 2018). A natureza vem desenvolvendo estratégias que são fundamentais para manutenção e desenvolvimento da vida. Sendo assim, na sua observação, que 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/bilhões de anos como estratégias para o design (BENYUS, 1997; MOREIRA, F. T. C, et al., 2015).

Esse estudo buscar relacionar e avaliar as embalagens naturais, ou seja, as frutas presentes na região do Nordeste brasileiro para abordar as descobertas surpreendentes e inspiradoras que, por sua vez, abrem caminhos sugestivos e inexplorados para uso de novas estratégias para aplicação no Design e na prototipação de produtos bioinspirados.

Na fig.1a e 1b, tem-se a morfologia anatômica do pomelo e uma Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) – que tem como função tornar visível

ao olho humano aquilo que não enxergamos, em que utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons (utilizados na microscopia tradicional) tornando-o um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para observação e análise de objetos. Na fig.1b é apresentado o albedo do pomelo e sua organização celular, evidenciando a estrutura como uma esponja para absorção de impacto para proteção das sementes contidas no endocarpo (DEDAVID, B.; GOMES, C.; MACHADO, G., 2007).

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, as cascas das sementes, bem como as espumas, esponjas naturais, normalmente, desempenham uma infinidade de funções, desde armazenamento até proteção. Essas funções biológicas que consistem na proteção direta ou indireta contra danos mecânicos ou outras influências ambientais negativas, compreendem princípios, construções biológicas, que conduziram estudos de modelos para o desenvolvimento de novos materiais e componentes para proteção de mercadorias e/ou pessoas contra danos causados, por impactos devido ao manuseio inadequado ou colisões (ORTIZ et al., 2018); (LI et al., 2019); (WANG et al., 2019). O estudo funcional, dessa organização estrutural, permitirá construir novos materiais bioinspirados, leves, de alto impacto e com uma combinação de alta dissipação de energia e amortecimento (BÜHRIG-POLACZEK et al., 2016; SANCHEZ, et al., 2005; SEIDEL et al., 2010).

Por meio de pesquisa e análise comparativa, também são apontados padrões e dimensões espaciais, incluindo os efeitos da gravidade e o efeito Coriolis. Esses efeitos influenciam diretamente e criam formas geométricas que espelham os sistemas de embalagem e as estruturas de crescimento da natureza, conhecidas como voronoi (BROECK, 2018).

Os princípios de padrões e mosaicos geométricos encontrados nas frutas serão estudados para indicar os padrões de repetição de arranjos alternativos ou de malha, como os evidentes em nós, redes, acolchoados e técnicas similares presentes, especificamente, nas frutas, evidenciados na fig. 2. Diante disto, tem-se o resultado da alternância das funções ativas e passivas assumidas, nas fibras durante o processo de construção nos cocos (LU et al., 2019).

Esses processos lógicos, com caráter técnico refletem o sistema presentes 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).

Figura 2 – Crescimento de unidades semelhantes e geometrias de empilhamento

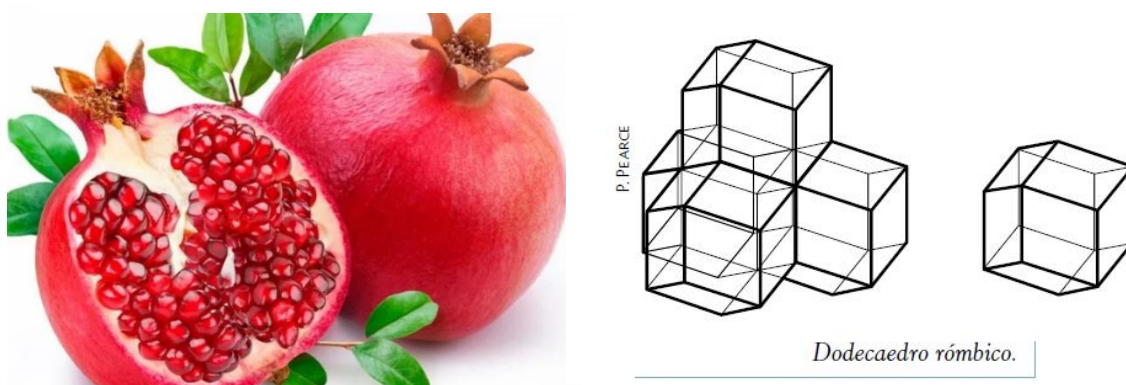


Fonte: (BROECK, 2018)

Empilhamento compacto, é encontrado em frutas como a Romã (fig. 3a) e é caracterizado pela busca de economia de espaço, promovida pela ação de forças externas sobre diversos elementos semelhantes (fig. 3b). Os padrões geométricos tendem a se acomodar da forma mais compacta possível,

minimizando as lacunas, o que induz um arranjo de agachamento, possibilitando um aproveitamento de espaço eficiente (BROECK, 2018).

Figura 3 – Geometrias de empilhamento da Romã



Fonte: (a) google imagens; (b) Fonte: Broeck (2018).

A biomimética faz parte de uma tendência geral de convergência entre Biologia, Design e Tecnologia (LANGELLA, C., 2019). Essa convergência está se tornando uma fonte de inovação do século XXI e junto com transformações na indústria manufatureira – chamada de indústria 4.0 – que está ocorrendo em todo o mundo, principalmente, na nova forma como os produtos estão sendo projetados e fabricados, oferecendo oportunidades para a transferência mútua de conhecimento, com surgimento potencial de um novo corpo de conhecimento, bem como o aparecimento ou crescimento exponencial de certas tecnologias, técnicas e modos de produção – chamadas de indústrias inteligentes (FINANCE, A. T. C. C, 2015).

Esse estudo vai tomar como definição metodológica a terminologia biomimética, há também várias definições, incluindo a biônica e design bioinspirados e *Biomimicry*. Em alguns países, todas essas terminologias são consideradas sinônimos, mas em outros, essas terminologias são entendidas de forma diferente. A distinção entre esses termos biológicos nem sempre é clara e pode confundir tanto novatos quanto experientes pesquisadores ou profissionais. Com isso, para melhor compreensão dos termos utilizados foi adicionado pela *International Organization for Standardization* a norma ISO/TC 266 *Biomimetics*, que possui a ISO 18458:2015 *Biomimetics - Terminology, concepts and*

methodology que apresenta algumas terminologias relacionadas a compreensão da natureza como inspiração (LANGELLA, 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 usa 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 de engenharia até agora. Isso significa que um grande número de sistemas biológicos com valor de engenharia potencialmente alto provavelmente passou despercebido (KANDA et al., 2018; MÜLLER, Rolf 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 vários campos do conhecimento de diferentes maneiras, mas tem 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).

1.1 Estrutura da tese

A tese foi estruturada em 4 Partes e 4 fases (Escopo, Descobrir, Criando e Avaliando) para o desenvolvimento dos objetivos específicos.

Parte I – Forneceu-se aos elementos pré-textuais, a contextualização, objetivos e justificativa de pesquisa abordando uma problemática desenvolvida. A definição do objeto de estudo, sua importância na pesquisa e respectivamente a delimitação, através do recorte em que o pesquisador deseja estudar e também o levantamento da pergunta e da hipótese.

Parte II – Estabeleceu-se o levantamento do Estado da Arte sobre a temática da pesquisa, referencial teórico, abordagem dos trabalhos resultantes

da Revisão Sistemática de Literatura (RSL), apontando seus objetivos, métodos e técnicas aplicadas, principais autores, seus respectivos resultados nos quais serviram de guia, para a etapa metodológica a ser seguida.

Parte III – Definiu-se todas as etapas metodológicas, realizadas em – escopo, descobrindo, criando – em que serviram respectivamente para o alcance dos objetivos específicos definidos. Abordando a atuação no campo material, o *corpus* empírico que atua no campo da pesquisa e da prática projetual para compreender o objeto de estudo, experimentos e análises. Esta atuação no campo material ocorre em alguns momentos principais:

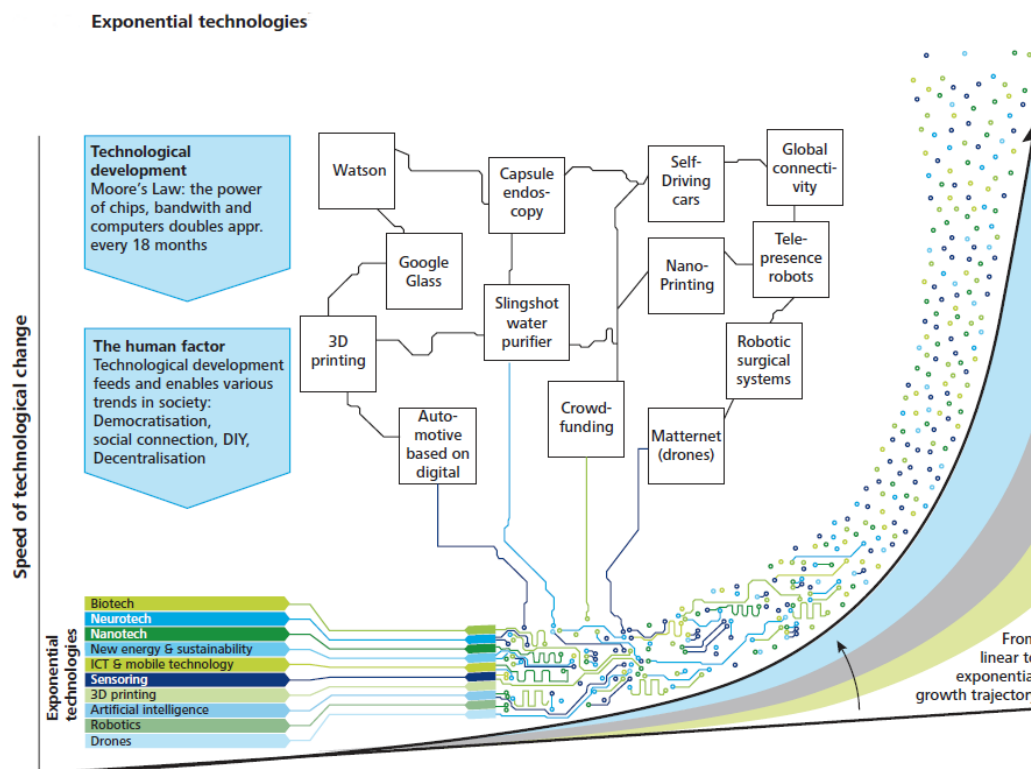
Parte IV – Apresentou-se a última fase da abordagem avaliando e a conclusão. 1. Prática de pesquisa através de investigação e apropriação do objeto de estudo, contexto e entorno; 2. Prática projetual através de etapas com foco no desenvolvimento em laboratório de artefatos gerados com dados da exploração do objeto de estudo; 3. Prática de pesquisa para quantificar e qualificar dados, analisar e avaliar os experimentos e artefatos gerados e apresentação de um protótipo desenvolvido por meio de impressão 3D e análise de porosidade da estrutura.

1.2 Justificativa e relevância da pesquisa

Artefatos bioinspirados, assim como a abordagem biomimética, fornecem um dos campos mais promissores para o Design. A busca por soluções de sistemas, materiais adaptativos, com estruturas hierárquicas ou compostos biodegradáveis impressos são uma das grandes preocupações das tecnologias vigentes de acordo com o Fig. 4 apontado por (FINANCE, A. T. C. C., 2015).

No entanto, já existe uma necessidade crescente da busca de materiais e tecnologias com tais características para usos multifuncionais, inteligentes, seletivos e bioinspirados com propriedades associadas, pois as soluções sempre se tornam limitadas em relação ao desenvolvimento de novos artefatos.

Figura 4 – Exponential technologies



Fonte: (FINANCE, A. T. C. C., 2015)

Com a evolução e surgimento de novas tecnologias como imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Microtomografia Computadorizada (Micro-CT) se introduziu novos processos de observação/produção que inclui a digitalização, inovação de materiais, nanotecnologia, desenvolvimento de processos biossintéticos que evoluem em direção a uma nova forma de produção industrial.

Junto a esse avanço dos modos de produção, tem-se como desafio, explorar a natureza de forma consciente em que a vida é um percursor constante que, se bem explorado, pode-se levar à essência para que se possa desenvolver, incorporar e se completar como indivíduos e zelar pelas gerações futuras. Além de tendências, consumo e estereótipos, precisa-se cumprir nossos papéis e expandir nosso potencial. O desafio é criar a partir da produção consciente e sustentável. E a Natureza fornece exemplos como seguir nessa evolução de forma eficaz e eficiente fazendo parte de um ciclo biológico.

Diversas vezes esquece-se que nossa estadia nesse planeta é recente, comparados a bilhões de anos de evolução. Muitos fatores separam fortemente

os seres humanos dessa fonte de conexão e do nosso lado intuitivo com a natureza. Diante dessa dicotomia dentre tantas questões, que a Biomimética parece ser uma solução, que não apenas observa a natureza como fonte de inspiração, mas também visa a reconexão com um mundo natural e harmônico. Quando se entende isso, fica mais fácil e significativo o conceito da biofilia. A biofilia representa nosso senso de conexão emocional e espiritual com a Natureza.

Na natureza encontra-se estruturas e materiais que exercem propriedades inspiradoras, como leveza, sofisticação, organizações hierárquicas, hibridação, resistência e adaptabilidade. Trazer à luz esses conhecimentos a partir do estudo desses componentes e seus respectivos princípios de construção, selecionados pela evolução, faz com que se proponha em projetos de design materiais mais confiáveis, eficientes e que respeitem o meio ambiente. Isso requer uma abordagem multidisciplinar como proposta de metodologia, através dos seus métodos e novas técnicas empregadas. Desse jeito, pode-se encontrar essa sofisticação por meio da observação da natureza. É surpreendente o alto grau de sofisticação que se encontra nas Embalagens Naturais. A natureza é, de fato, uma escola para ciência de novos materiais e suas disciplinas associadas, tais como Química, Biologia, Biofísica, Engenharia e Design, dentre outras.

A biomimética torna-se fomentadora de soluções e estratégias para diversos campos entre as ciências como a biotecnologia. Representa um importante setor competitivo para indústria nacional baseada na pesquisa voltada para essa nova era industrial que se configura – quarta revolução industrial – que visa uma indústria inteligente para produtos projetados com inteligência. Esse estudo visa relacionar as estratégias usadas pela natureza de diferentes tipos de frutas encontradas na natureza que podem ser aplicadas em diferentes campos do conhecimento para o desenvolvimento de soluções que tendam a otimizar a relação entre recursos, desempenho, transferência de conhecimento, princípios e lógicas. Isso nunca foi tão relevante em face aos desafios técnicos, econômicos e ambientais da indústria moderna. Diante disso, este estudo surge na conjuntura de estabelecer fundamentação para convergência entre: problema, a inspiração biológica e desenvolvimento de um

escopo metodológico inspirados na natureza para desenvolvimento de produtos bioinspirados.

Dentre todos esses aspectos, há diversos desafios que estão em constantes estudos pela indústria da tecnologia, como: estruturas de proteção automobilística com a finalidade de dissipação de energia após colisões; na indústria de calçados – com sistemas de absorção de impactos de alta performance; embalagens, da área médica, que suportem colisão; em capacetes; em material para proteção eletrônica. Dentre outros, que justificam a relevância de se estudar e observar o que a natureza desenvolveu para abstração dessas estratégias em artefatos bioinspirados.

O número crescente de trabalhos de pesquisa incluídos na *web of Science Database* (WOS) e *Analyze search results Scopus Database*, indicam que as atividades globais têm aumentado constantemente nos últimos anos, assim como os países e universidades envolvidos. A biomimética tem chamado a atenção de muitos países e estudiosos como um *hotspot* na pesquisa científica no século XXI e desempenhará um papel cada vez mais importante na produção industrial e agrícola, no desenvolvimento científico e tecnológico.

1.3 Problemática e Recorte do objeto de estudo

1.3.1 Objeto de estudo

Tem-se como objeto de estudo frutas cuja organização estrutural das células tem características de amortecimento contida em suas cascas (pericarpo). Quanto à escolha do objeto de estudo, a pesquisa é caracterizada, Segundo Yin (2001), por um estudo de caso, que consiste em uma profunda e exaustiva investigação do objeto de estudo permitindo um amplo aprofundamento do conhecimento da realidade e dos fenômenos pesquisados, nos contextos que são submetidos.

1.3.2 Problemática

É amplamente conhecido que a disponibilidade de estruturas leves com excelente capacidade de absorção de energia é essencial para inúmeras aplicações. Inspiradas por muitas estruturas biológicas da natureza, as estruturas bioinspiradas demonstraram apresentar uma melhoria significativa em relação às estruturas convencionais em diversos aspectos. Portanto, o uso da abordagem biomimética para projetar novas estruturas leves com excelente capacidade de absorção de energia tem aumentado nos campos da engenharia e do design nos últimos anos, para diversos âmbitos de aplicação: na indústria automotiva, embalagens para transportes de frutas, equipamentos eletrônicos, assim como artefatos para proteção individual como capacetes, na indústria de tênis. Esses estudos apresentam, geralmente, como característica em comum – buscar novos materiais e maior eficiência para melhoramento de performance do usuário ou artefato proposto.

A demanda por novos produtos junto com o aparecimento de novas técnicas de manufaturas possibilita um ambiente promissor para a área do objeto de estudo. Este estudo propõe uma visão abrangente dos avanços recentes no desenvolvimento de estruturas bioinspiradas e suas propriedades relacionadas às estruturas biológicas, presentes nas frutas, que estudadas podem fornecer estratégias para desenvolvimento de produtos otimizados para absorção de energia e amortecimento para melhor performance nos diversos âmbitos.

A hierarquia estrutural, presente nos arranjos celulares encontrados na natureza, pode ser estudada analogicamente para desenvolver novos compostos (materiais) e estruturas com propriedades desejáveis. Com isso, estudos dos pericarpos das frutas são introduzidos em várias escalas e em diversas áreas do conhecimento e são usados como sistemas de absorção de energia em vários âmbitos industriais. Como afirma, Tsang, H. H., & Raza, S. (2018), que revelaram que a capacidade de absorção de energia de impacto pode ser melhorada significativamente quando a hierarquia é introduzida e maior aprimoramento é obtido para seções hierárquicas de ordem superior, em que se realizou um estudo paramétrico, e com o uso de parâmetros adimensionais, a robustez e a generalidade do fenômeno foram analisadas e demonstradas em seus estudos.

A Biomimética e a bioinspiração são abordagens promissoras para o desenvolvimento de novos materiais e estruturas para o design de novos produtos com estratégias intrínsecas. Na observação de como a natureza otimiza suas fontes de materiais biológicos para configurações estruturais para uma funcionalidade mais eficiente. Por conseguinte, este trabalho traz uma série de benefícios com a investigação e categorização de estruturas presentes nas frutas para melhor aprender seus princípios típicos desde os microníveis da inspiração biológica até prototipação de um produto contendo essas características com auxílio dos novos métodos de manufatura digital. Com isso, demonstrando uma melhoria significativa na capacidade de absorção de energia quando a hierarquia é introduzida e maior aprimoramento é obtido para seções hierárquicas de ordem superior.

1.3.3 Recorte de pesquisa

A pesquisa apresenta delimitação com relação ao que segundo Marconi; Lakatos (2010):

(1) **Objeto:** consiste na escolha de maior ou menor número de variáveis que intervêm no fenômeno a ser estudado que podem condicionar o grau de precisão e especialização do objeto.

(2) **Campo de Investigação:** abrange limite de tempo quando o fator deve ser estudado em determinado momento, e limite no espaço, quando deve ser analisado em certo lugar. Trata-se respectivamente da indicação do quadro histórico e geográfico em relação ao assunto abordado na pesquisa

- Frutas que apresentam características intrínsecas para absorção de energia; Impacto e a colisões (presentes em suas cascas);
- Restringe-se ao reino vegetal, com o recorte geográfico cujo âmbito se localiza as frutas presentes na flora do Nordeste brasileiro.

1.4 Objetivos de investigação

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma estrutura bioinspirada por meio das tecnologias recentes da Biomimética e suas implicações no campo do Design bioinspirado para o desenvolvimento um protótipo 3D de uma estrutura abstraída do pericarpo de um fruto com características de amortecimento.

1.4.2 Objetivos Específicos

(1) Realizar uma revisão sistemática de literatura (RSL), para levantamento do estado da arte, sobre estruturas e materiais bioinspirados para aplicações de amortecimento, absorção de impacto e colisão, presente nos pericarpos das frutas;

(2) Indentificar as frutas e categorizar as estruturas bioinspiradas para absorção de energia e identificar características morfológicas, estruturais e espaciais presentes nos estudos;

(3) Realizar uma pesquisa exploratória através da microscopia óptica, para observação e seleção dos frutos com as características de absorção de energia e amortecimento, de acordo com a problemática abordada;

(4) Analisar a anatomia vegetal através do processamento de imagens em MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) por meio da crio-fratura para maior compreensão estrutural;

(5) Submeter o fruto selecionado a análises de microtomografia de raio-x. Estudos por fatiamento e inteiras (sem processo invasivo), através de imagens Micro-CT e as respectivas discussões e estruturação das análises encontradas;

(6) Desenvolver um modelo digital tridimensional (mesh), através de software de reconstrução tridimensional das estruturas encontradas abstraída da fruta selecionada para o estudo de caso;

(7) Fazer prototipação 3D da estrutura encontrada por meio da prototipagem rápida (Fabricação digital).

1.5 Pergunta e hipótese da pesquisa

1.5.1 Pergunta do problema

Através da análise estrutural e transposição dos princípios biológicos contidos em determinadas frutas de resistir a impactos e colisões, durante a queda, em diferentes âmbitos, podem ser utilizados como referência no desenvolvimento de estruturas bioinspiradas?

1.5.2 Hipótese

Através da combinação de métodos e técnicas é possível desenvolver uma estrutura bioinspirada com os mesmos princípios da hierarquia estrutural presente nas frutas com característica de amortecimento e absorção de impacto, com alta dissipação de energia, com eficientes propriedades de amortecimento e uma recuperação significativa de deformações.

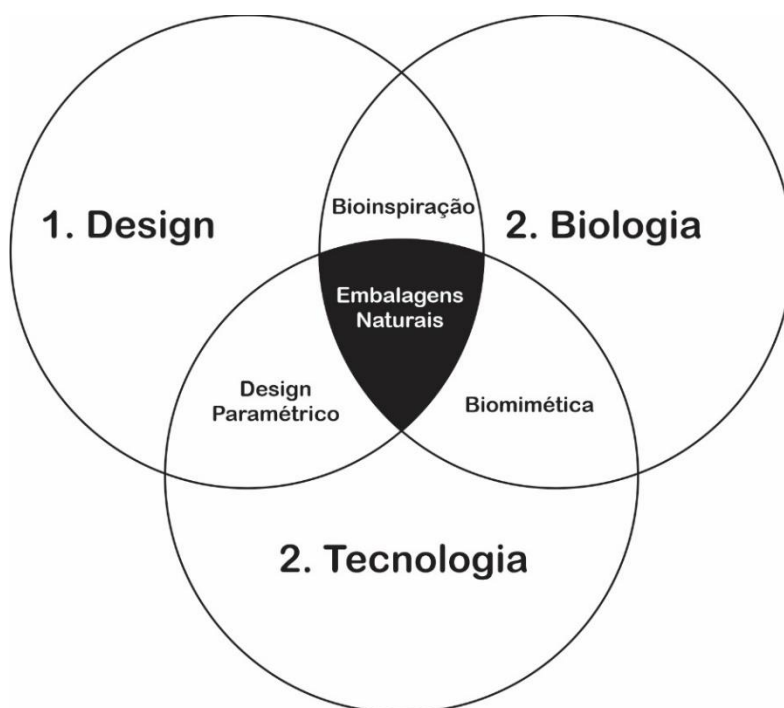
Parte II

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Conjunto teórico

O Estado da Arte encontra-se estruturado a partir das propostas de investigação exploratórias para atender ao propósito de expansão intelectual e científico que visa relacionar as áreas de competências e seus campos de estudos para contribuir com o desenvolvimento da base teórica científica nas respectivas áreas do conhecimento. Para maior compreensão foi elaborado um gráfico (fig. 5) apoiado nas principais vertentes da pesquisa que possuem relação direta com o objeto de estudo em questão:

Figura 5 – Conjunto teórico



Fonte: autor

A seguir foram elencados todos os estudos advindos da RSL através do método estabelecido por (CONFORTO et. al, 2011) abordando: o ente biológico, suas estratégias e abstração para desenvolvimento bioinspirado (Anexo I).

O conjunto teórico fornece a estrutura para a fundamentação teórica para cada subtópico e está dividido em 6 áreas do conhecimento que foram gerados através de suas interseções e no centro o objeto de estudo: **Embalagens Naturais**.

- **Design x Biologia:** Bioinspiração
- **Design x Tecnologia:** Design paramétrico
- **Biologia x Tecnologia:** Biomimética

O levantamento da fundamentação teórica se deu através da RBS para questões de pesquisas específicas e foram analisadas na parte de proteção, resistência e absorção contra choques mecânicos, conforme a metodologia da revisão sistemática.

Nos demais campos de conhecimento as pesquisas se deram por meio de palavras-chaves em bancos de dados nacionais como: Portal de periódico CAPES por meio do acesso remoto CAFE (Confederação Acadêmica Federada) e acesso a banco de dados nacionais e internacionais (Scopus, Web of Science, Springer Nature e SciELO) para as demais áreas de conhecimento.

Dessa maneira, retornando trabalhos relevantes que serviram para a fundamentação teórica e norteamto dessa pesquisa. Para identificar as ferramentas de biomimética existentes, foi realizada uma variedade de termos de pesquisa, incluindo 'biomimética', 'biomimética', 'bioinspiração', 'design de inspiração biológica' e 'biônica', em combinação com o termo de pesquisa 'ferramenta', foram usados para selecionar os trabalhos retornados.

2.2 Biomimética, princípios e contextualização

Nos últimos anos, a biomimética tem sido cada vez mais utilizada no campo das pesquisas aplicadas para desenvolvimento de novos produtos e materiais. 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 nos vários campos das ciências, seja no intelectual ou no prático (OLIVEIRA et al., 2021).

Ao longo de milhões de anos, a natureza vem desenvolvendo materiais e estruturas de alto desempenho. Dessa maneira, fornece fontes valiosas de inspiração para o projeto de materiais estruturais para melhorias ou desenvolvimento de novos produtos, dada a variedade de excelentes propriedades encontradas na natureza. A fim de melhorar os materiais e estruturas tradicionais para a absorção de energia, cientistas, engenheiros e designers tentam aprender com os organismos biológicos com estruturas resistentes que evoluíram de forma otimizada ao longo das gerações (SAN HA et al., 2019). Logo, a biologia natural oferece excelentes estruturas 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 (de bios, significando vida, e mimese, significando imitar) foi geralmente definida como "o exame da natureza, seus modelos, sistemas, processos e elementos para emular ou se inspirar para resolver problemas humanos". A resolução de problemas humanos tem sido uma grande força motriz neste campo de pesquisa. A biomimética como um conceito científico vem atraindo a imaginação de pesquisadores muito além dos objetivos de produzir melhores drogas, 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).

A natureza gera arquiteturas estruturalmente complexas com tamanhos de recursos cobrindo várias escalas de comprimento em condições ambientais bastante simples e com recursos limitados. Hoje, os pesquisadores entendem como muitas dessas estruturas parecem e se comportam, mas, em muitos casos, ainda não tem a capacidade da natureza de combinar essas estruturas com as funcionalidades complexas. Ao desvendar as maravilhas do design da natureza, os cientistas desenvolveram materiais biomiméticos com funções e comportamentos inteiramente novos. Em particular, os métodos baseados em

solução fornecem rotas simples e baratas para a geração de estruturas biorreplicadas (RISBUD; BARTL, 2013).

At its simplest, biomimetics is the design and production of materials, structures, and systems that are modelled on biological entities and processes. The concept of biomimetics stems from the realization that microbes, plants, and animals have been continuously evolving to cope with environmental and other challenges. The design challenges associated with vision, movement in diverse environments, temperature control, and detection of predators and/or prey have already been solved in a myriad ways over millions of years of evolution, providing rich opportunities for development of biomimetic and bioinspired materials. The diversity in form and function of living things is such that they have evolved solutions to most of the challenges that face humans today. We just have to look for those solutions! Janine Benyus pioneered this approach to problem solving in her 1997 book entitled *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature* – biomimicry being an alternative name for biomimetics. (PRIMROSE, 2020, pag.1)

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 desenvolvimentos tecnológicos. 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 esta razão, Bioinspiração, Biomimética e 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 particular de um sistema biológico. Portanto, antes de transferir os princípios biológicos para a tecnologia, devemos reconhecer e distinguir esses princípios entre uma enorme complexidade biológica. Existem várias abordagens para lidar com esse problema (LAKHTAKIA; MARTÍN-PALMA, 2013).

A primeira abordagem é biológica clássica, em que um sistema funcional particular é estudado comparativamente em vários organismos. Neste caso, podemos potencialmente reconhecer as mesmas soluções funcionais tendo evoluído 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 bioinspiração, levando à biomimética e 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 dentro dos sistemas naturais, que podem ser usados como modelos na ciência e na engenharia de novos materiais. No entanto, deve-se reconhecer que tal estudo deve se concentrar na elucidação das relações entre estrutura e função em sistemas naturais, a fim de aplicar o fruto de tal estudo na engenharia (ELLISON, M. S., 2013).

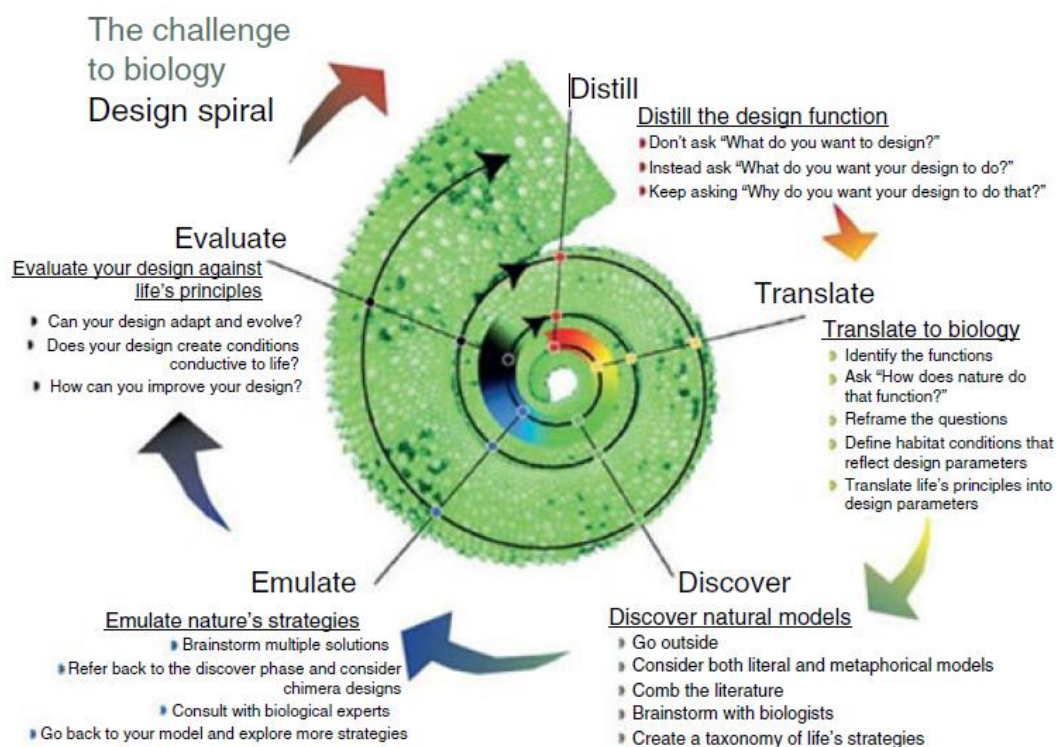
A biomimética experimentou um rápido desenvolvimento desde que Janine Benyus publicou seu trabalho seminal em 1997. Nesse trabalho, ela definiu a biomimética como tendo três componentes primários:

- Natureza como modelo. Novas soluções para problemas humanos.
- Natureza como medida. Ecologia / evolução como padrão do que funciona.
- Natureza como mentora. Aprenda com a natureza, não tire com ela.

A evolução da biomimética gerou vários termos em torno dos quais formar discussões. Um dos primeiros termos para esse campo é biônica, e a biomimética foi cunhada no início dos anos 1950. *Bionic* 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 biomimética permaneceram sob a alçada da comunidade científica. Outros termos também estão em uso. O relatório do *NRC Inspired by Biology* forneceu as seguintes definições.

- Biomimética. Aprender o princípio mecanicista de uma função natural e, em seguida, tentar alcançar essa função em um material sintético.
- Bioinspiração. Ao observar uma tarefa específica executada por um sistema natural, obtenha inspiração para um sistema sintético realizar a mesma tarefa.
- Bioderivação. Híbrido entre materiais e funções naturais e sintéticos apresentada na fig. 6 abaixo.

Figura 6 – How to use reverse biomimicry in product design



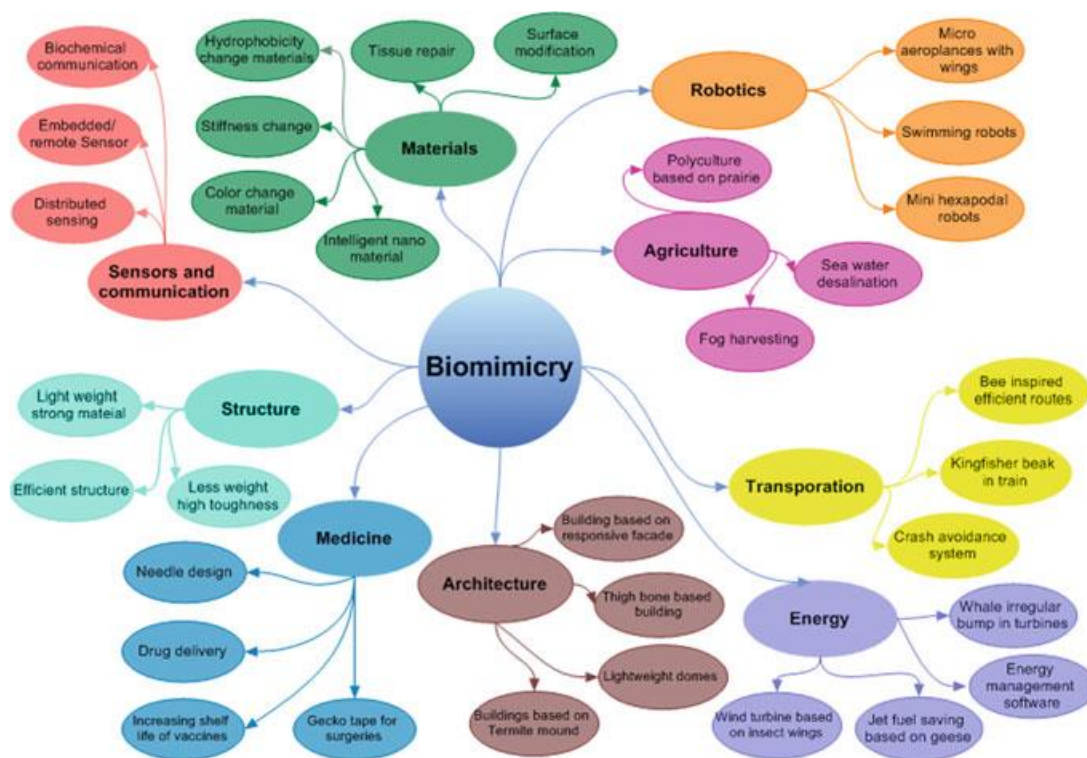
Fonte: Biomimicry Institute

A ISO/TC 266 Biomimetics levou às seguintes definições (ISO/ TC266 2015):

- Bioinspiração: "Abordagem criativa baseada na observação de sistemas biológicos".
- Biomimética: "Filosofia e interdisciplinaridade abordagens de design tomando a natureza como modelo para atender os desafios do desenvolvimento sustentável (social, ambiental e econômica).
- Biomimética: "Cooperação interdisciplinar de biologia e tecnologia ou outros campos de inovação com o objetivo de resolver problemas práticos a análise de funções de sistemas biológicos, seus abstração em modelos e a transferência para e aplicação desses modelos à solução".
- Biônica: "Disciplina técnica que busca replicar, aumentar ou substituir funções biológicas por suas equivalentes eletrônicos e/ou mecânicos".

Atualmente, a biomimética é empregada nas seguintes disciplinas (fig. 7) e estão inspirando diversos campos emergentes. Como destacam (SHARMA; SARKAR, 2019).

Figura 7 – Aplicações da biomimética em diferentes campos



Fonte: (SHARMA; SARKAR, 2019)

Sharma; Sarkar (2019) reuniram e apresentaram as principais metodologia, métodos e ferramentas de aplicação da biomimética.

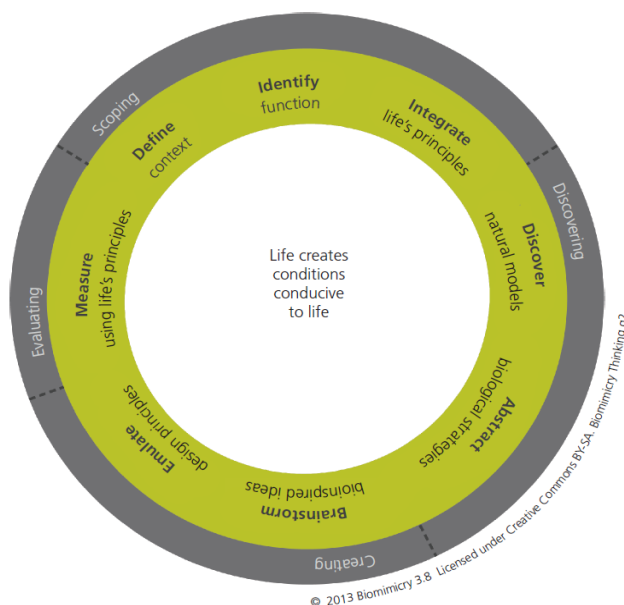
Helms; Vattam (2009) apresentaram um processo de projeto de engenharia de inspiração biológica e forneceram insights sobre projeto de inspiração biológica como um tipo de atividade de projeto. O trabalho fornece um relato descritivo de processos e produtos de design de inspiração biológica.

Nagel et al., (2010) apresentam duas abordagens de geração de conceito que usam um modelo biológico para descobrir componentes de engenharia correspondentes que imitam o sistema biológico e usam um repositório de informações de engenharia e biológicas para descobrir quais componentes

biológicos inspiram soluções funcionais para atender aos requisitos de engenharia.

Rowland (2017) apresenta quatro fases (fig. 8) do processo biomimético descreve desde a posição de ensiná-lo aos desenvolvedores de produtos e serviços, processos, estruturas e sistemas que são projetados para futuros sustentáveis e soluções potenciais para problemas humanos.

Figura 8 – *Biomimicry thinking process*



Fonte: (ROWLAND, 2017)

As quatro fases do design de pensamento biomimético processo para a abordagem do desafio à biologia são descritos por Rowland (2017).

Etapa 1. Definição do escopo: Há uma contextualização do problema de design e através da descrição do desafio/problema de design escolhido, tem-se a descrição do contexto em que a problemática surge e uma solução potencial de design, listando a função específica que uma solução potencial deve cumprir, por meio de um resultado esperado e princípios de vida mais relevantes para o tipo específico de desafio de projeto.

Etapa 2. Descoberta: começa com design baseado em função de uma questão de pesquisa baseada em biologia. Uma ferramenta muito útil para trazer questões do campo da biologia de pesquisa apresentada seria a Taxonomia da

Biomimética, pois ajuda especialmente os não-biólogos a encontrar a linguagem certa para pesquisar funções específicas na literatura científica.

Etapa 3. Criação: envolve participantes convidados adicionais de uma variedade de disciplinas para trazer uma diversidade de novas perspectivas para o design.

Etapa 4. Avaliação: um o protótipo é apresentado e avaliado formalmente, novamente e em um nível muito mais profundo, em relação aos princípios da biomimética. O princípio biológico é abordado separadamente e completamente, e se discute como está incorporado na solução proposta final e o que precisaria ser melhorado para alcançar um melhor alinhamento com os padrões da natureza.

Wanieck et al., (2017) apresentaram um processo de design bioinspirado para resolução de problemas. Todos os processos de design bioinspirados usam ferramentas para apoiar o processo completamente. Algumas das ferramentas precisam de um maior aprendizado, já outras são bastante menos complexas. A pesquisa mostra a visão geral de 43 ferramentas e métodos identificados que foram desenvolvidos para facilitar o processo de biomimética. São apresentados com o ano de publicação ou seu desenvolvimento documentado, uma breve descrição e referências à fonte de publicação. A visão geral está em ordem cronológica de seu desenvolvimento.

Abaixo, no Quadro 1, elaborado por Sá e Viana (2020). São apresentadas as publicações e elencadas em ordem decrescente dos artigos mais citados e suas principais contribuições a partir de levantamentos em duas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*.

Quadro 1 – Artigos mais citados e suas principais contribuições em biomimética

Nome do Trabalho	Autores	Citações	Principais Contribuições
<i>Biomimetics: lessons from nature - an overview</i>	Bhushan	593	Evidencia abordagens de biomimética em escala microscópica, para o desenvolvimento de materiais, aparelhos e superfícies a partir de propriedades morfológicas e físico-químicas. Demonstra um panorama geral de organismos e processos naturais apontando possíveis aplicações em produtos de mercado.

<i>Design and fabrication of multi- material structures for bioinspired robots</i>	Cutkosky; Kim	57	Apresenta processos de prototipagem rápida multimaterial no desenvolvimento de robôs bioinspirados. Discute usos de estruturas rígidas, flexíveis e sensores em projetos da área de robótica cujas configurações baseadas na natureza demandam menos controle ativo em comparação com métodos tradicionais.
<i>Microstructured barbs on the North American porcupine quill enable easy tissue penetration and difficult removal</i>	Cho; et al.	54	Ressalta aplicações baseadas nas estratégias de defesa de <i>Erethizon dorsatum</i> por meio de suas estruturas pontiagudas dorsais. As descobertas demonstram boa adesão e reduzem a força necessária para penetração em tecidos, podendo ser adotadas em aparelhos médicos, adesivos, agulhas e tunelizadores vasculares.
<i>Evolution of reaction center mimics to systems capable of generating solar fuel</i>	Sherman; Vaughn; Bergkamp; et al.	48	Conduz um mapeamento de reações artificiais baseadas em fotossíntese para desenvolver combustíveis mediante processos fotoquímicos. São destacadas pesquisas sobre sistemas fotoelétricos capazes de usar luz para converter água em oxigênio e hidrogênio.
<i>Integrating backcasting and eco- design for the circular economy the BECE framework</i>	Mendoza; Sharmina; Gallego-Schmid; Heyes; Azapagic	27	Discute configurações de economia circular (EC) para mitigar impactos na degradação ambiental e apresenta o <i>framework</i> BECE (<i>backcasting and eco-design for the circular economy</i>) aplicável em design. Investigações abordagens baseadas na natureza (biomimética, <i>cradle to cradle</i> , capitalismo natural, design regenerativo) são apreciadas.
<i>Synovial joint lubrication - does nature teach more effective engineering lubrication strategies?</i>	Neville; Morina; Liskiewicz; Yan	27	Exibe observações sobre transferências de princípios biomiméticos para a engenharia, na área do desenvolvimento de lubrificantes naturais são sintetizadas. As análises concentram-se em juntas sinoviais como fundamentação para gerar sistemas eficientes e duráveis.
<i>Biomimicry as a problem-solving methodology in interior architecture</i>	El-Zeiny	25	Apresenta a combinação de biomimetismo e design em projetos de interiores. São exibidos elementos essenciais e cases de configurações arquitetônicas e superfícies. É implementada uma discussão sobre as potencialidades e limites da biomimética nesse cenário.

Fonte: Sá e Viana (2020).

2.3 Bioinspiração

A natureza, com sua extraordinária diversidade, oferece uma gama de possibilidades aparentemente “infinitas” para desenvolvimento de produtos e materiais inovadores. Esta declaração abrange materiais biomiméticos abrangendo, por meio de dimensões micro e nanoescala, e todo o caminho para estudos a nível molecular. Na natureza encontramos princípios que precisam ser

elucidados e interpretados visando analogias com um caráter sistemático, para o desenvolvimento de projetos bioinspirados. Dessa forma, podem-se ser aplicados em problemas projetuais (ARRUDA, 2002).

A exploração de conceitos e materiais naturais pode assumir diferentes formas, desde o uso de biomoléculas reais para aplicações humanas, como “prospecção” da floresta tropical em busca de substâncias com potencial farmacêutico, até a fabricação de novos materiais cujas características estruturais e organização hierárquica, por exemplo, são inspirados pela natureza. A bioinspiração abrange e discute exemplos de sistemas, com ênfase em novas funcionalidades que incorporam a integração de conceitos biológicos, por um lado e o mundo da ciência dos materiais por outro. Como tal, este campo multidisciplinar baseado sobretudo na biologia, nanotecnologia, ciência dos materiais e disciplinas relacionadas, produz continuamente novos materiais, processos e conceitos usados em uma variedade de aplicações (JELINEK, 2013).

A Bioinspiração refere-se ao processo de aprendizagem com a natureza e seus princípios biológicos. A ciência dos materiais bioinspirados visa desenvolver novos materiais funcionais com propriedades avançadas e multifuncionais usando as nano, micro, meso e macroestruturas e características de materiais naturais com o objetivo de atender aos requisitos do bem-estar humano. Mecanismos naturais e materiais biológicos podem ser explorados para projetar materiais avançados para resolver os problemas encontrados na vida humana. Na verdade, o foco da ciência dos materiais está sendo cada vez mais mudado para o desenvolvimento de materiais bioinspirados, impulsionado pela escassez de recursos, o baixo custo e as características superiores dos materiais naturais e as preocupações ambientais e climáticas (YANG, 2018).

Para tanto, é essencial compreender o fenômeno biológico, os materiais biológicos naturais e os processos envolvidos em sua produção natural e, portanto, desenvolver abordagens de biofabricação ou fabricação bioinspirada. A compreensão das funções fornecidas pelas espécies e processos encontrados na natureza viva pode nos guiar para a produção de nanomateriais, nanodispositivos e processos com funcionalidade desejável. Os materiais da natureza têm inúmeras características intrigantes, incluindo 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).

O objetivo da biomimética não é simplesmente imitar a natureza. Uma vez que se compreende como a natureza faz seu trabalho, pode-se então fabricar estruturas e dispositivos ideais usando materiais inteligentes e técnicas de fabricação. Não se faz biomimética, mas, em vez disso, desenvolve projetos bioinspirados, adaptação ou derivação da natureza viva. Isso pode ser referido como biodesign (WHITESIDES, 2015).

O objetivo da pesquisa em biomimética segundo Bhushan (2016) é desenvolver materiais e superfícies de interesse comercial inspirados na biologia. A abordagem é tripla:

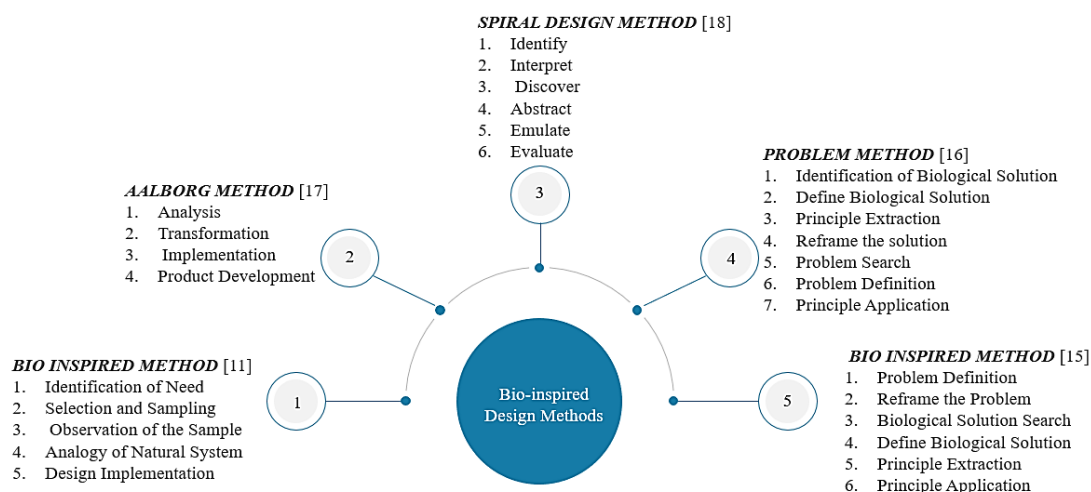
1. As espécies são selecionadas da natureza que fornecem funcionalidade de interesse comercial.
2. As espécies são caracterizadas para entender como uma espécie natural fornece funcionalidade. Em seguida, ele é modelado e as estruturas geralmente são fabricadas em laboratório usando a rota da natureza para verificar a compreensão. A modelagem é usada para desenvolver estruturas ótimas.
3. A natureza tem uma caixa de ferramentas limitada e usa materiais básicos e métodos de fabricação rotineiros para as espécies, e capitaliza estruturas hierárquicas. Uma vez que se entende como a natureza faz isso, pode-se fabricar estruturas ideais usando materiais inteligentes e técnicas de fabricação para fornecer a funcionalidade de interesse.

A natureza desenvolveu materiais e estruturas de alto desempenho ao longo de milhões de anos de evolução e fornece fontes valiosas de inspiração para o projeto de materiais estruturais de última geração, dada a variedade de excelentes propriedades mecânicas, hidrodinâmicas, ópticas e elétricas. A biomimética, ao aprender com os conceitos da natureza e princípios de design, está impulsionando uma mudança de paradigma na ciência e tecnologia de materiais modernos. No entanto, as arquiteturas estruturais complicadas na natureza excedem em muito a capacidade das tecnologias tradicionais de design

e fabricação, o que impede o progresso do estudo biomimético e seu uso em sistemas de engenharia (BUDHOLIYA et al., 2021).

A técnica de design espiral resultou na criação de um briefing de design focado nas necessidades humanas (fig. 9), utilizando modos naturais e explorando conceitos inventivos para gerar ideias. A técnica do problema examinou os níveis micro e macro para reformular a resposta traçando analogias entre os sistemas e componentes (BUDHOLIYA et al., 2021).

Figura 9 – *The bio-inspired design methods*



Fonte: (TROTТА, 2011 apud BUDHOLIYA et al., 2021).

Yang et al., (2018) apontam que a manufatura aditiva (impressão tridimensional 3D) criou novas oportunidades para manipular e imitar as estruturas intrinsecamente multiescala, multimaterial e multifuncional da natureza. Aqui, uma visão geral dos desenvolvimentos recentes em impressão 3D de mecânica reforçada biomimética, mudança de forma e estruturas hidrodinâmicas, bem como dispositivos ópticos e elétricos, é fornecida. As inspirações vêm de várias criaturas, como nácar, garra de lagosta, pinha, flores, polvo, asa de borboleta, olho de mosca, etc., e várias tecnologias de impressão 3D são discutidas. Oportunidades futuras para o desenvolvimento da tecnologia de impressão 3D biomimética para fabricar materiais e estruturas funcionais de

próxima geração em engenharia mecânica, elétrica, óptica e biomédica também são descritas

A biomimética, ao aprender com os conceitos da natureza e princípios de design, está impulsionando uma mudança de paradigma na ciência, tecnologia e novos materiais. No entanto, nem sempre conseguimos desenvolver com fidelidade as estruturas encontradas na natureza devido à limitação das tecnologias tradicionais de design e fabricação, desse modo, isso impede o progresso do estudo biomimético e avanços na prototipação e testes de novos modelos. Todavia, os avanços na manufatura aditiva criaram novas oportunidades para manipular e imitar as estruturas intrinsecamente em multiescala, multimaterial e multifuncional da natureza (YANG et al., 2018).

Há diversos organismos biológicos encontrados na natureza que desempenham função de proteção ou que precisam se proteger contra danos causados por cargas mecânicas. Materiais biológicos como encontrado nas cascas das frutas, como pomelo, macadâmia e nozes, podem exibir alta dureza e tenacidade, e desempenham uma excelente proteção por meio de sua sofisticada estrutura hierárquica presente nas suas fibras, conforme Flores-Johnson (2018). As estruturas desses compósitos geralmente possuem características equivalentes, como afirmam Zhao et al., (2014), essa combinação de componentes e arranjos em multiescala fornecem princípios de projeto de design valiosos para a preparação de inspiração para desenvolvimento de materiais de amortecimento com amplas aplicações na indústria.

Através da observação da natureza, pode-se buscar muitas estruturas com alta capacidade de absorção de energia, resistência, baixa densidade que podem inspirar novos projetos com notáveis estruturas para absorção de impacto, como observado no fruto Pomelo – *Citrus maxima* – que possui uma camada esponjosa de mesocarpo que pode dissipar uma grande quantidade de energia, como mostra os testes observados Fisher et al. (2010). As nozes, assim como os cocos, também apresentam uma grande resistência ao impacto.

Li et al. (2019) estudaram as características naturais de crescimento da fibra do fruto do coco por meio da observação das macros e micros estruturas. Os estudos demonstraram que a energia absorvida por materiais reforçados com fibras é complexa porque vários fenômenos complexos de dissipação estão

envolvidos, como o crescimento de trincas, esmagamento e fricção. E revelam, através da derivação teórica e modelo numérico, que a energia total absorvida por materiais reforçados com fibras consiste apenas na energia de deformação e que como resultado pode-se ser aplicada a projetos para eficiência em resistentes a choques e colisões.

Os projetos de materiais, por natureza, são bastante diferentes dos conceitos tradicionais de engenharia e oferecem um vasto reservatório de soluções elegantes para problemas de engenharia. A natureza usa métodos engenhosos para criar uma grande variedade de materiais com excelentes propriedades físicas e mecânicas (BUDHOLIYA et al., 2021).

Esses materiais são construídos em temperatura e pressão ambientes a partir de uma seleção bastante limitada de componentes. Imitar esses projetos e processos de materiais biológicos pode criar materiais de engenharia avançados úteis para várias aplicações. No entanto, os designs naturais inspirados em estruturas biológicas têm se mostrado difíceis de imitar sinteticamente, principalmente por causa da falta de conhecimento da relação estrutura - propriedade dos materiais e métodos de processo. Como resultado, há uma necessidade crescente para que as comunidades acadêmica, de pesquisa e industrial compreendam os princípios de design de materiais biomiméticos e procurem maneiras inovadoras de abordar essas questões (ZHENHAI, 2016).

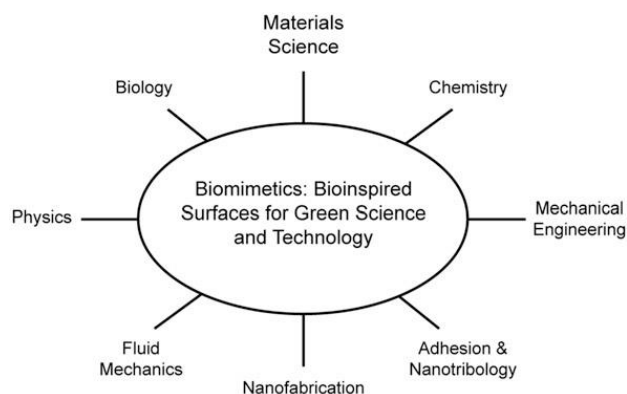
Nas superfícies das folhas das plantas têm uma ampla gama de estrutura e morfologia, o que lhes confere propriedades multifuncionais. A fotossíntese é um processo que as plantas empregam para capturar a energia do sol e usá-la para sustentar a vida. Superhidrofobicidade, autolimpeza, anti-incrustante, redução de arrasto, adesão e movimento da planta são todas características das folhas das plantas. Devido à rugosidade hierárquica (microbumps sobrepostos com uma nanoestrutura) e à presença de um revestimento hidrofóbico de cera, folhas de plantas repelentes de água, como *Nelumbo nucifera* (lótus), são conhecidas por serem superhidrofóbicas, autolimpantes e anti-incrustantes (BARTHLOTT et al. 2017).

A principal vantagem da pesquisa em biomimética é que ela permite o desenvolvimento de projetos ideais que aproveitam os avanços obtidos ao longo

da evolução da natureza viva, bem como o uso efetivo dos recursos naturais de maneira mais sustentável e ecologicamente correta (verde). Projetos bioinspirados também podem permitir mecanismos de autocura ou adaptação para se recuperar de impactos ambientais e sobreviver. Materiais e superfícies de inspiração biológica despertaram uma atenção generalizada e estão influenciando o que chamamos de "ciência e tecnologia verdes" (BHUSHAN, B., 2016).

Conforme demonstrado por Bhushan, (2016), na Fig. 10, a biomimética é um campo muito interdisciplinar. Biólogos, físicos, químicos e cientistas de materiais trabalham juntos para estudar as funções biológicas, estruturas e princípios de muitos itens encontrados na natureza, o que pode levar a design, adaptação ou derivação biologicamente inspirados da natureza viva. No que se refere à engenharia, bioinspiração ou biodesign seria um nome mais apropriado. (BHUSHAN, 2016).

Figura 10 – *Interdisciplinary nature of the field of biomimetics*

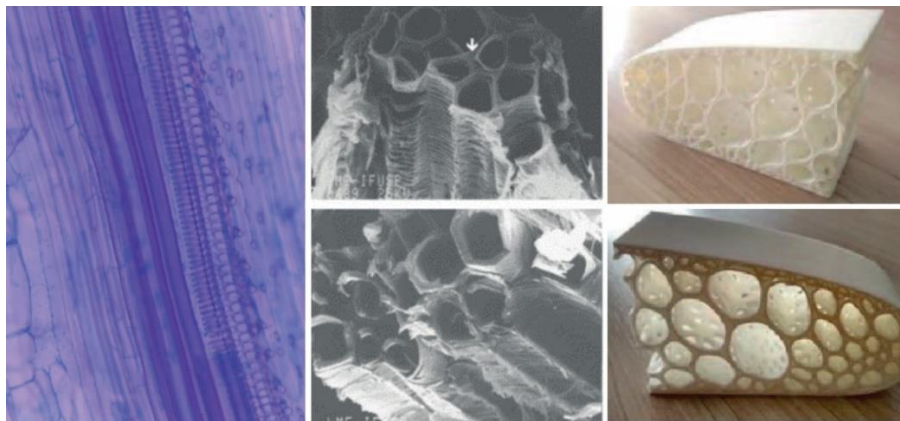


Fonte: (BHUSHAN, B., 2018)

Segundo Araújo, R., Arruda, A., Arruda, E. (2019), A produção de inúmeros artefatos requer matérias-primas. O aumento da demanda por recursos naturais finitos para extração de matérias-primas, por outro lado, contribui muito para a degradação ambiental. Os recursos naturais, como as fibras lignocelulósicas (fig. 11), estão sendo cada vez mais utilizados em substituição aos materiais sintéticos. Entre as fibras vegetais mais utilizadas, as fibras de *Agave sisalana* são uma opção muito útil devido às suas qualidades mecânicas superiores. Nesse estudo buscou-se as estratégias da natureza complexa e multifuncional dos sistemas biológicos no desenvolvimento de materiais bioinspirados, especialmente, no contexto da fabricação digital,

utilizando uma abordagem metodológica multidisciplinar em biomimética no campo do design de materiais e no campo da biologia.

Figura 11 – Microscopia óptica, micrografia (SEM) da *Agave sisalana*. Impressão 3D da estrutura bioinspirada.



Fonte: adaptado de (ARAÚJO, R., ARRUDA, A., & ARRUDA, E. (2019))

Segundo FAGUNDES, H. et al (2020), os elementos naturais fornecem um grande número de composições, texturas e relações morfológicas que podem ser estudadas usando uma lógica geométrica. Esta pesquisa investiga o estudo de formas bioinspiradas com o objetivo de utilizá-las em painéis de fachada de edifícios. Inicialmente, o estudo foi realizado uma revisão de geometrias naturais, texturas e gramática de formas apresentado na fig. 12.

Uma variedade de frutas com função de embalagem protetora foi investigada. As amostras foram fotografadas em várias escalas, digitalizadas tridimensionalmente e digitalizadas por tomografia computadorizada, e depois ilustradas. Em seguida, utilizando um software generativo que permite modificações composicionais formais e cinéticas, foram estabelecidos parâmetros geométricos de sua estrutura e realizadas investigações de parametrização bidimensional e tridimensional. Por fim, é possível concluir que esse método de pesquisa, que considera diversos fatores, é eficaz.

Figura 12 – Obtenção de soluções bioinspiradas – uma proposta para sequenciamento passo-a-passo tomando o exemplo do fruto da Jupati

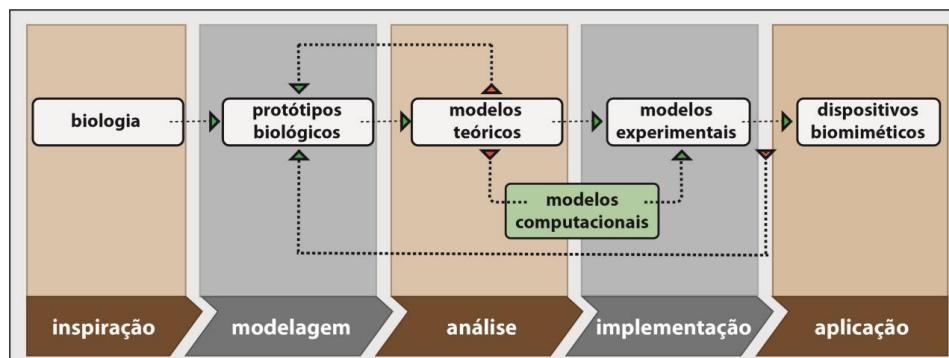


Fonte: (FAGUNDES, H. et al., 2020)

Em sua tese Fagundes (2021) afirma que a natureza é abundante nas formas em que se organiza para proteger, desenvolver e prolongar a vida que carrega. Enquanto o reino animal é dinâmico e móvel, o reino vegetal é estacionário e conta com o deslocamento da planta mãe por meio de diversas táticas de dispersão de frutos e sementes para manter sua continuidade.

Frutos e sementes, bem como sua forma, têm sido pesquisados em uma perspectiva geométrica como fonte de inspiração para uso na construção de revestimentos externos. Sua pesquisa utilizou alguns frutos de casca dura como exemplos dessas possibilidades, que atuam como um recinto complexo para preservação e proteção do material genético sob diversas condições até a germinação. Dessa maneira utilizou alguns frutos de casca dura como exemplos dessas possibilidades, que atuam como um recinto complexo para preservação e proteção do material genético até a germinação sob diversas condições. Abaixo na fig.13 foram apresentados o processo da bioinspiração da inspiração à aplicação (FAGUNDES., 2021).

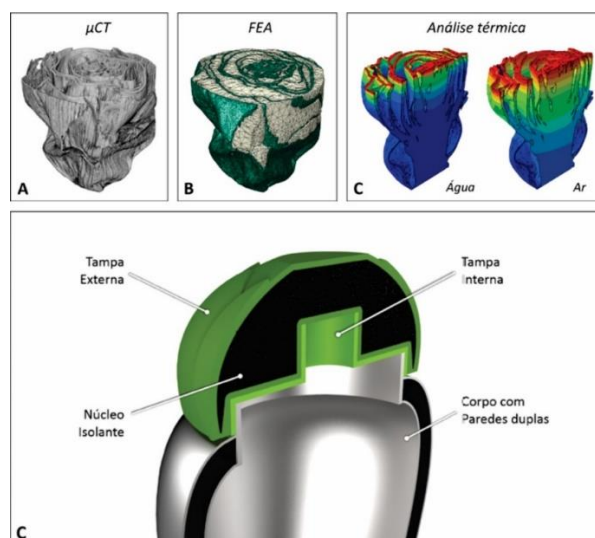
Figura 13 – Método de projeto bioinspirado



Fonte: Hu et al., (2009) apud (FAGUNDES, H., 2021)

Segundo Palombini; Oliveira e Mariath, (2021), certas espécies de bromélias têm como propriedade importante na construção de inflorescência-tanque, uma região em que a água é agrupada para manter a temperatura do interior e proteger as flores da troca abrupta de calor com o exterior. Este estudo apresentou característica para a construção de uma garrafa térmica bioinspirada (fig. 14), na qual a tampa foi construída com a adição de um núcleo no interior, utilizando o processo de desenho baseado na biônica. Foi criado um mapa de seleção de material para determinar qual das melhores opções a incluir no modelo, com o objetivo de maximizar a calorimetria, minimizando ao mesmo tempo a condutividade térmica.

Figura 14 – Garrafa térmica bioinspirada

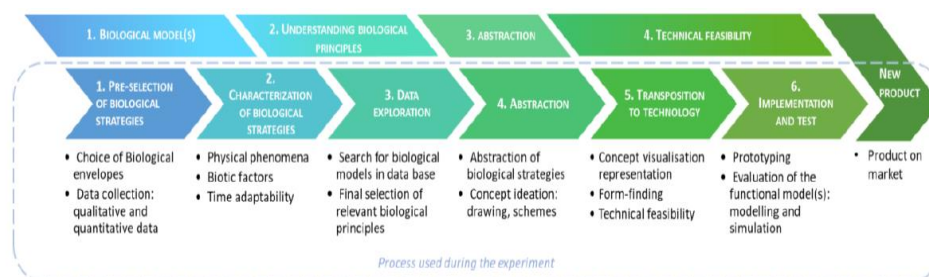


Fonte: (PALOMBINI, F. L., OLIVEIRA, B. F., MARIATH, J. E. A., 2021).

Segundo, Hubert, Tessa et al. (2021), os revestimentos dos edifícios, que são apresentados como envelopes, desempenham um papel importante no conforto dos ocupantes. A sua concepção, execução, e funcionalidade têm um impacto significativo no desempenho global do edifício. Alguns estudos recentes concentram-se em formas de melhorar a eficiência energética dos edifícios, reduzindo simultaneamente o seu impacto ambiental. A bioinspiração, ou a utilização de criaturas biológicas para desenvolver soluções técnicas, tem sido um campo em crescimento na indústria da construção há décadas. Os sistemas vivos são o resultado de sucessivas adaptações ao longo de milhares de milhões de anos, a fim de sobreviver num ambiente confinado. Apresentam frequentemente táticas de optimização em vez de maximização, tais como responder às oscilações climáticas e regular muitos elementos físicos como calor, luz e ar com recursos naturais e renováveis disponíveis localmente.

Esta pesquisa é uma aplicação de um framework (fig. 15) de projeto de bioinspiração, com o objetivo de desenvolver um envelope de construção adaptável e multifuncional como produto. Como ponto de partida, os autores optaram por explorar a abordagem *biology-push* adaptada do processo de design descrito pela ISO standard 2015:18458.

Figura 15 – Comparação do processo de design biomimético orientado a soluções



Fonte: Retirado de HUBERT, Tessa et al. (2021) e ISO standard 2015:18458.

Para Helms; Vattam; Goel (2009) apud Brioschi, et al. (2017) a bioinspiração é interessante na pesquisa em design devido à:

- Interdisciplinaridade do design bioinspirado, uma vez que este requer conhecimentos específicos em áreas de biologia e engenharia, e a capacidade de correlação entre estas áreas;

- Desafios de comunicação, uma vez que biólogos e engenheiros estudam diferentes áreas, com linguagens bastante próprias;
- Diferentes métodos de investigação e diferentes perspectivas sobre um mesmo problema, uma vez que, em geral, os biólogos possuem maior foco em compreender o design da natureza, enquanto engenheiros buscam novas formas de design que solucionem novos problemas;
- Design bioinspirado normalmente resulta em um design mais funcional e interdependente;
- Os recursos disponíveis na natureza, como materiais e processos, são diferentes dos disponíveis na área de engenharia.

De acordo com Sousa (2017), a transposição biológica para produtos bioinspirados, não é apenas resultado da observação de estruturas naturais, mas também requer uma investigação abrangente das relações estrutura-função em biomateriais, aprendizagem. Dessa forma, a característica a ser descoberta depende da estrutura. Durante a evolução das espécies, a natureza desenvolveu uma série de estratégias para gerar ou otimizar excelentes propriedades funcionais, que podem fundamentar o desenvolvimento de materiais funcionais comumente associados, envolve custos relativamente baixos, em alguns casos apenas pela estrutura hierárquica.

2.4 Design paramétrico

Para Estevez (2003) o Design paramétrico inclui um método computacional para projetar um sistema de funções determinadas que irão projetar o objeto, permitindo a criação de uma ampla gama de variações geométricas. O projeto paramétrico começa na base do modelo com parâmetros para controlar a geometria, criando uma ampla gama de possibilidades de projeto através de um conjunto planejado de regras e algoritmos. A modelagem paramétrica é um processo de modelagem, que pode ser simulado em computador, que permite uma modelagem próxima ao desenvolvimento genético estudado em Biologia (COSTA, 2008).

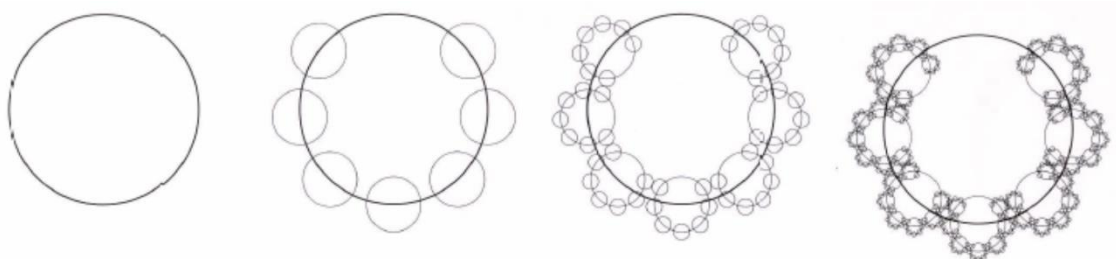
Segundo Langella, C. & Santulli, C. (2017) o interesse pelo design natural também chama a atenção para questões biológicas com a vida dos organismos

e sua remodelação gradual e contínua, que tem paralelos com os processos de formação aditiva atuais. Neste último, a estrutura começa com uma linha reta e depois se conforma e se adapta, enquanto a natureza começa com uma espiral, permitindo a evolução de criaturas em que a linearidade existe apenas como abstração conceitual. No entanto, ao focar em questões de design, o designer é capaz de sugerir com sucesso semelhanças com estratégias evolutivas usadas por organismos biológicos.

Essas formas e princípios utilizados no projeto paramétrico são derivados, em alguns casos, da transposição de lógicas de crescimento estudadas e traduzidas por biólogos, matemáticos e engenheiros em modelos ideais e algoritmos recorrentes na natureza: sua transferência é baseada em analogias estratégicas; mas nem sempre é assim. Em outros casos, baseiam-se na "semelhança", mas sem uma base científica biológico-matemática efetiva. É fundamental que os designers interessados na dimensão do design paramétrico entendam que o uso de algoritmos de derivação biológica 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 se mostrar muito relevantes no projeto (HOOKER et al., 2016 *apud* LANGELLA, C. & SANTULLI, C., 2017).

Um modelo CAD, é um conjunto de proposições matemáticas. A declaração de que o segmento entre seus pontos finais é um componente do modelo é expressa por um objeto de linha. O sistema frequentemente faz cálculos matemáticos: adicionar novos pontos ao plano ativo, desenhar uma linha tangente a um círculo através de um ponto e designar um ponto como o centroide de um polígono são exemplos de conclusões matemáticas simples. Os designers fornecem evidências de seus projetos, não apenas coleções de reivindicações. Eles produzem provas matemáticas de que os projetos descritos são posteriores às suas suposições fundamentais, utilizando estruturas como grades, snaps, interseções circulares e tangentes, conforme fig. 16. No design comumente vemos profissionais que projetam concebendo através de sequências geométricas (ROBERT WOODBURY, 2010).

Figura 16 – Construção por geometria através de computador



Fonte: Retirado (ROBERT WOODBURY, 2010).

Compreender matemática (particularmente geometria) e computação pode ajudar a trazer alguns princípios de design para um foco claro. Trabalhar com descrições tão rigorosas limita o leque de formas que podem ser representadas, mas as conecta em uma lógica comum (ROBERT WOODBURY, 2010).

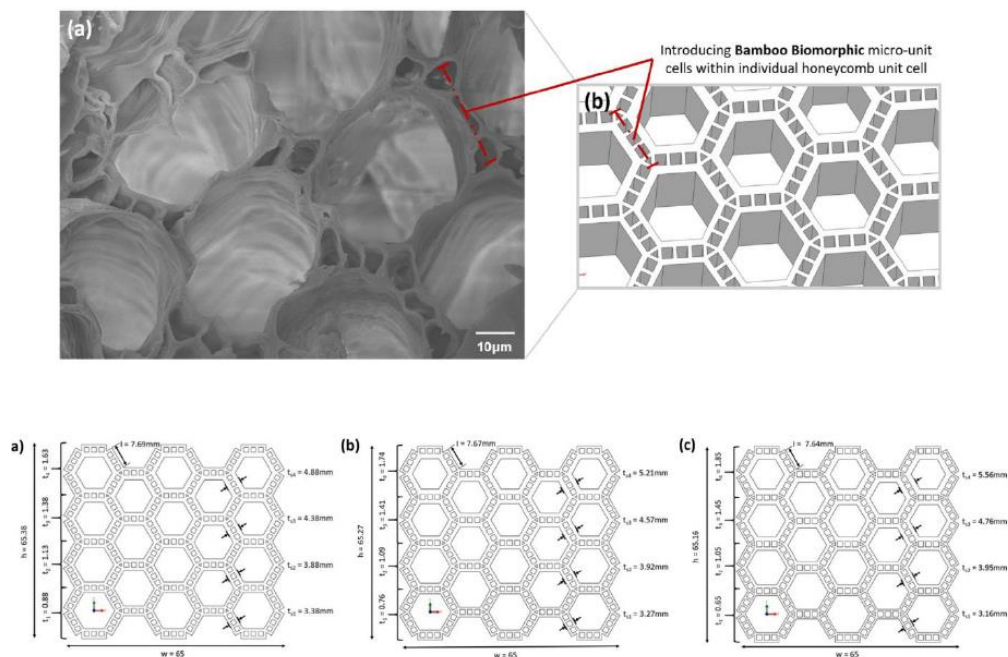
Ajdari, A., Nayeb-Hashemi, H., & Vaziri, A. (2011) estudaram o esmagamento dinâmico no plano de favos de mel bidimensionais com arranjos hexagonais regulares e irregulares usando modelos detalhados de elementos finitos através do ABAQUS. Dessa forma os autores concluíram no estudo que: a geometria celular, especificamente o gradiente de densidade das paredes celulares, é fundamental para o processo de deformação e o desempenho das estruturas celulares.

Ufodike, C. et al., (2021) propuseram um projeto paramétrico proposto auxiliaria os princípios de projeto de engenharia para o desenvolvimento de uma nova estrutura celular biomórfica, para obter um desenho paramétrico inspirado no bambu natural, que tem potencial para fabricação uma gama de projetos de engenharia eficientes para absorção de energia. Essa estrutura de absorção de energia pode ajudar a melhorar o design da estrutura leve para várias aplicações, incluindo automóveis e aeronaves, garantindo segurança sob carga de impacto.

Os resultados observados na fig. 17 implicam que os arranjos microestruturais naturais únicos podem ajudar no projeto e fabricação de uma nova classe de estruturas de absorção de energia de alto desempenho para aplicações de engenharia do mundo real. Em estudos futuros, o projeto estrutural paramétrico bioinspirado sugerido oferece a topologia estrutural para melhorar

as geometrias da estrutura, otimizando a absorção de energia e a eficiência da força de esmagamento (UFODIKE, C. et al., 2021).

Figura 17 – (a) MEV do bambu. (b) Estrutura biomórfica do bambu



Fonte: Retirado (UFODIKE, C. et al., 2021)

2.5 Embalagens naturais

As frutas podem desenvolver diversas estratégias para as quais algumas delas envolvem a perpetuação da espécie. Dessa forma, podem apresentar estruturas para maior proteção contra choques mecânicos como evidenciados nas frutas tropicais, dessa forma contendo estruturas hierárquicas como as encontradas no pomelo ou apresentar uma surpreendente organização interna para melhor aproveitamento do espaço, como 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 arsenal de soluções que as tornam adequadas

para a vida nas condições mais exigentes e extremas (PREIß, S., DEGENHARDT, J., & GERSHENZON, J., 2014).

Além disso, está bem estabelecido que as plantas e seus frutos são capazes de apresentar plasticidade considerável em sua morfologia e fisiologia em resposta à variabilidade dentro de seu ambiente e sobreviver a condições e estresses ambientais extremamente diversos. Explorar a natureza das Embalagens Naturais significa observar como a vida envolve, protege, contém, preserva, transporta e comunica suas estratégias (GRIJALVA, 2018).

As cascas das frutas protegem e identificam as mercadorias da mesma forma que as embalagens artificiais (HALLETT, I. C., & SUTHERLAND, P. W. 2006). Dessa forma, aplicar essas soluções aos problemas industriais. Nesse sentido, um dos grandes avanços na ciência dos materiais hoje em dia é dado pela inspiração da natureza (ARRUDA, 2002). A inspiração em soluções naturais permite o desenvolvimento de novos materiais com propriedades estruturais aprimoradas, aplicáveis em diversos campos (incluindo produtos de consumo, automotivo e arquitetura) e com capacidade de sensoriamento e atuação (ZHANG, W., YIN, S., YU, T. X., & XU, J., 2019).

Na fig. 18 estabeleceu-se várias estratégias das embalagens naturais contidas nas cascas das frutas que envolvem, conservam e protegem as sementes contra eventuais choques. As sementes fornecem o elo genético vital e o principal agente de dispersão entre sucessivas gerações de plantas. Elas são produzidas e embaladas em estruturas botânicas ao qual chamou-se embalagem natural. Em que armazena e possuem estratégias de empilhamentos para melhor aproveitamento do volume interno do endocarpo. Algumas frutas possuem cores estruturais, que atraem tipos de insetos, comunicam e alguns frutos possuem cascas que consegue transportar a semente em segurança para outros locais. A seguir cada estratégia foi estruturada para melhor compreensão na fig.18 apresentando 4 campos de estratégias nas embalagens naturais.

Figura 18 – Estratégias das Embalagens Naturais



Fonte: autor

2.5.1 Comunicação e Cor estrutural

Segundo Vignolini, S. et al., (2012) a comunicação biológica, por meio da cor estrutural, existe há pelo menos 500 milhões de anos. Como o as cores das asas da Borboleta Morpho azul que são exemplos de dispersão de luz produzidas por escamas em suas asas de borboleta iridescentes brilhantes, assim como as bárbulas de penas de aves e como a cauda do pavão (GHIRADELLA, 2010; VUKUSIC & SAMBLES, 2003; VUKUSIC et al., 2000; (WILTS et al., 2009; THOMÉ et al., 2020).

A cor estrutural é comumente observada no reino animal, mas tem sido pouco estudada em plantas. A coloração química por corantes e pigmentos é responsável pela maioria das cores dos animais. As cores florais, com algumas exceções, também são produzidas quimicamente (ELLISON, M. S., 2013).

Os organismos produzem cores de duas maneiras básicas: sintetizando pigmentos que absorvem seletivamente a luz de certas bandas espectrais de modo que apenas a luz fora das bandas de absorção seja retroespalhada (cor química) ou desenvolvendo nanomorfologias que aumentam a reflexão da luz de certos comprimentos de onda por interferência (física cor ou cor estrutural) (WASIK, B., 2014).

Um dos novos métodos emergentes de coloração de materiais têxteis é através do fenômeno de interferência que é a base para a coloração das asas das borboletas. Em geral, a asa da borboleta consiste em duas ou mais camadas de pequenas escamas residentes em uma membrana, que permitem que a

difração ocorra (ELLISON, M. S., 2013). Mas encontramos na *Pollia condensata* a cor estrutural que confere ao fruto um aspecto brilhante e intenso que se mantém após cair da planta, aumentando a probabilidade de atrair um animal e ser disperso. Alternativamente, frutos de cor estrutural podem se dispersar atraindo pássaros. A natureza reúne uma vasta gama de biomoléculas a partir de alguns blocos de construção básicos que são organizados em nanomateriais com dimensões em nano ou macro escala para fornecer capacidades biológicas únicas (BHUSHAN, 2016).

Isso inclui dispositivos de escala molecular, autolimpeza, conversão de energia, conservação de energia, alta adesão, adesão reversível, sustentação aerodinâmica, materiais e fibras de alta resistência mecânica, automontagem biológica, antirreflexo, isolamento térmico, autocura, mecanismos de ajuda sensorial e coloração estrutural (MOREIRA, F., 2015).

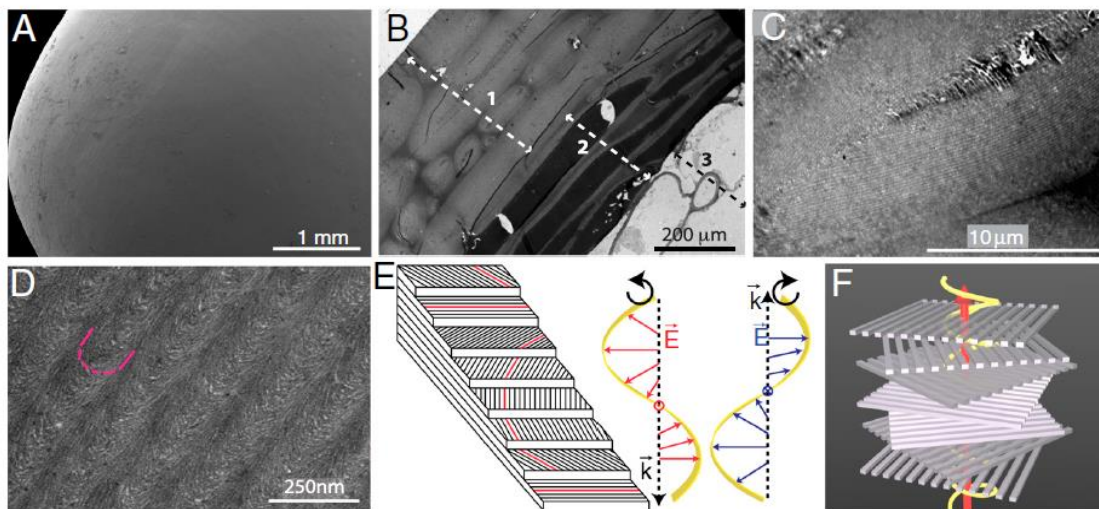
Um exemplo notável de forte coloração iridescente baseada em multicamadas em plantas, é o fruto de *Pollia condensata* (Fig.19). A cor é causada pela reflexão de microfibrilas de celulose empilhadas helicoidalmente que formam multicamadas nas paredes celulares do epicarpo evidenciadas na fig. 11. A coloração azul brilhante desta fruta é mais intensa do que a de qualquer material biológico previamente descrito. Única na natureza, a cor refletida difere de célula para célula, pois a espessura da camada múltiplas são variadas, dando à fruta uma aparência pixelizada ou pontilista. Como as multicamadas se formam com ambas em formato helicoidal, a caracterização ótica revela que a luz refletida de cada célula epidérmica é polarizada circularmente para a esquerda ou para a direita, uma característica nunca antes observada em um único tecido (VIGNOLINI, S. et al., 2012).

Figura 19 – *Pollia condensata* com cor estrutural



Fonte: google imagens.

Figura 20 – Anatomia da *Pollia condensata*



Fonte: (VIGNOLINI, S. et al., 2012)

Na fig. 20 temos a anatomia da *Pollia condensata*. (A) imagem SEM da superfície do fruto mostrando a camada cuticular lisa. (B) corte transversal SEM mostrando três zonas de tecido distintas: (1) um epicarpo externo de 3-4 camadas de células de paredes espessas, (2) uma região intermediária de 2-3 camadas de células taniníferas e (3) uma zona de células de paredes finas. (C)

SEM de uma única célula de parede espessa da camada 1. (D) SEM das microfibrilas de celulose que constituem a parede celular espessa na camada 1. (F) representação da orientação do conjunto de microfibrilas de celulose e um feixe circularmente polarizado transmitido.

A cor é um dos presentes mais abundantes e duradouros da natureza para a humanidade. Embora a cor seja uma ferramenta evolutiva fundamental para os organismos, os humanos têm usado cores e pigmentos extraídos de plantas ou animais principalmente para fins estéticos, mas também para uma variedade de aplicações funcionais, como revestimentos, sensores, fotossíntese artificial e outras. Pesquisas recentes também analisaram as aplicações fotônicas de fenômenos de cores naturais e pigmentos biológicos. Embora tenha havido numerosos exemplos de moléculas de corantes biológicos extraídas de fontes naturais, a discussão a seguir se concentrará nos efeitos estruturais de cores, ou seja, cores produzidas por características estruturais únicas de superfícies biológicas que podem ser imitadas em designs de superfícies artificiais (JELINEK, 2013).

A cores nas frutas também pode estar relacionada a polinização e refere-se à função dos ecossistemas em basicamente promover a transmissão de material genético entre as plantas (muitas vezes por abelhas ou outros insetos, mas também por meio de alguns pássaros e morcegos), permitindo que floresçam, frutifiquem e se reproduzam. O processo de transmissão espacial de material relacionado à reprodução das plantas é chamado de dispersão de sementes (através de pássaros, outros organismos, ventos e correntes oceânicas). A polinização é fundamental para a continuidade da vida de plantas e animais (incluindo humanos) (KEVAN; VIANA, 2003 apud ZARI, 2018). A polinização de insetos e pássaros é responsável por 76% das culturas alimentares mais comuns e significativas do mundo (ZARI, 2018).

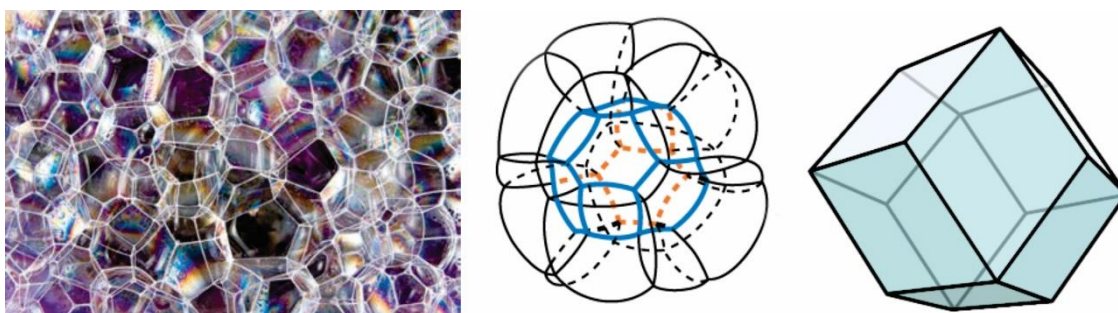
A mudança de cor nos frutos também está relacionada a comunicação para seu estado de amadurecimento (GRIJALVA, 2018).

2.5.2 Armazenamento, Geometria e Volume

As características de empilhamento distinguem-se pela busca da economia espacial, que é auxiliada pela ação de forças externas em vários elementos semelhantes. As pedras tendem a se acomodar da forma mais compacta possível, com a menor quantidade de interstícios, resultando em um arranjo quádruplo. No plano, uma rede hexagonal com junções triplas é formada pelo empilhamento compacto de uma série de círculos elásticos que são comprimidos até que os interstícios sejam eliminados. Dependendo do grau de compressão e acomodação, as esferas comprimidas definem diferentes tipos de poliedros no espaço (BROECK, 2018).

Em um nível microscópico, a água agitada interage com o ar para formar bolhas (fig. 21), com a pressão do ar equilibrada pela tensão superficial da água. Esse fenômeno pode ser melhor visualizado adicionando sabão à água, o que aumenta sua viscosidade e confere maior estabilidade ao fenômeno. Cada bolha tem duas superfícies: uma do lado de dentro e outra do lado de fora. Duas bolhas separadas tendem a ficar juntas porque cada uma reduz sua área de superfície compartilhando uma parte com a outra (BROECK, 2018).

Figura 21 – Empilhamento compacto nas bolhas de sabão



Fonte: Adaptado de Fonte: (BROECK, 2018)

No mundo vegetal temos como exemplo a romãzeira – *Punica granatum* L. – que é uma árvore tropical e subtropical muito apreciada pelos seus excelentes frutos comestíveis. O fruto possui exocarpo coriáceo, e o interior é dividido em compartimentos por paredes membranosas e tecido esponjoso

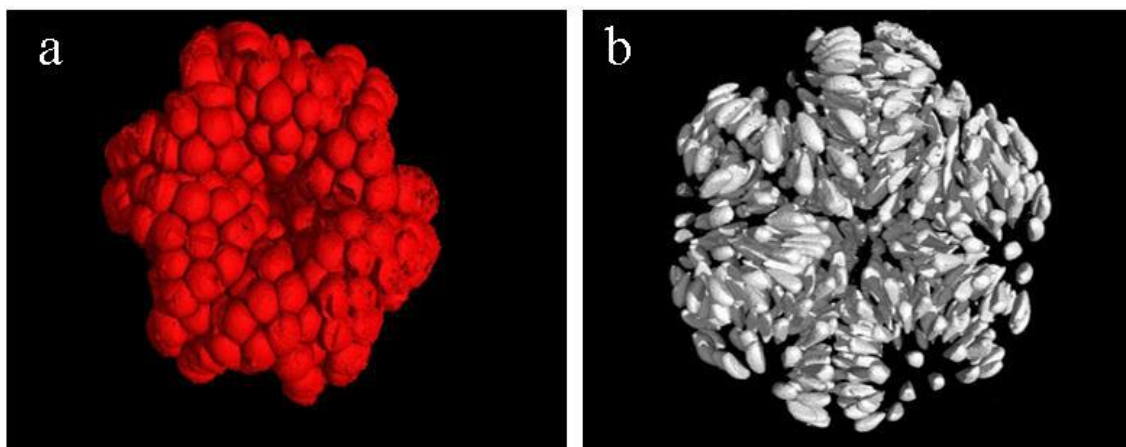
branco (HOLLAND et al., 2009). Na fig. 22, podemos evidenciar o empilhamento das sementes do fruto para um melhor aproveitamento da volumetria. Na fig. 23, podemos ver sua organização através da tomografia computadorizada que evidenciam as estruturas (ariolos) por ser uma técnica não destrutiva, não ocasiona danos ao material, essa técnica possibilita a visualização tridimensional de pequenas amostras, por meio da união digital (fig. 21) de centenas de cortes transversais (QUEIROZ et al., 2019).

Figura 22 – Romã e organização espacial das sementes



Fonte: google imagens

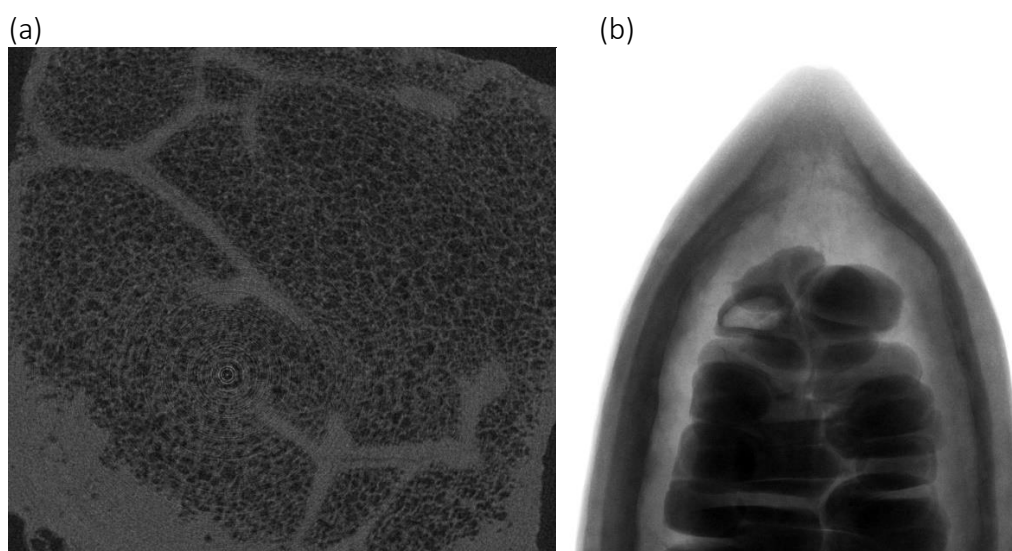
Figura 23 – Modelos 3D de (a) ariolos de romã e (b) grãos reconstruídos por empilhamento de flutuação



Fonte: (ARENDSE, E., 2016)

A interação de forças internas e externas determina as formas da natureza. Cada forma representa um delicado equilíbrio dessas duas forças. Um floco de neve caracteriza todas as formações cristalinas: a forma genérica é determinada pela simetria interna do arranjo atômico do cristal, e a forma específica adotada por um cristal específico é imposta pela ação do meio (temperatura, pressão, umidade etc.). Há uma unidade por trás da aparente diversidade das manifestações da natureza, pois estas são o resultado da combinação de alguns princípios básicos de construção. Associados a formas fundamentais das quais derivam todas as outras. Esses princípios, em geral, se sucedem nos processos de formação (BROECK, 2018).

Figura 24 – (a) Tomografia de raio-x do *Citrus* em corte central. (b) Tomografia de raio-x do *Theobroma cacao* em corte longitudinal.



Fonte: autor em colaboração com DEN (UFPE)

Na *Citrus*, na fig.24a, observa-se uma estrutura esponjosa com disposição das paredes celulares. No cacau, fig. 24b obteve-se o empilhamento das sementes e organização espacial. Com essa técnica é notável o estudo de estruturas, armazenamento e volumetria com um método não invasivo. Apesar da laranja ser um corte de 5x5mm da casca do fruto, as estruturas observadas estão no interior da amostra. As imagens foram realizadas através da microtomografia de raio-x utilizando o XT H 225 ST.

De duas estruturas semelhantes, a maior é a mais fraca porque, com o crescimento, a área superficial por unidade de volume diminui e, portanto, a resistência. Segundo Broeck (2018) Galileu mostrou que, à medida que uma maçã cresce, seu peso aumenta em relação à seção transversal do caule que a sustenta ao galho. A maçã acaba caindo, devido à progressão do relacionamento V/S . As formas, geometria e padrões de disposições recorrentes para um melhor aproveitamento do espaço para se obter um maior volume é observado em alguns frutos com características esféricas (GRIJALVA, 2018).

Devido a isso, Broeck (2018) explica várias coisas:

- A forma dos pequenos frutos tende a forma esférica (fig. 25), com a função de proteger as sementes.

Figura 25 – Forma esférica do *Citrus*



Fonte: autor

- Frutos grandes, apesar de terem os mesmos requisitos funcionais, assumem uma forma alongada (fig. 26), como uma gota, que corresponde à distribuição ótima de cargas gerado pelo aumento significativo de peso em relação à superfície de contenção.

Figura 26 – Formatos dos frutos do cacau, jaca e mamão



Fonte: google imagens

- Os frutos mais pesados geralmente crescem ao nível do solo, como é o caso das abóboras e dos melões, pois representam muito peso para os galhos. Existem exceções como jaca e mamão, mas esses frutos crescem agrupados ao redor do tronco, onde não exercem momentos de flexão.

2.5.3 Transporte

Adaptações nos métodos de proteção e dispersão de sementes que permitem a diversificação em novos habitats impulsionam o desenvolvimento das plantas. Isso é evidenciado pela enorme variedade nas estruturas de floração e frutificação observadas entre e dentro das linhagens de plantas. Uma notável diversidade de tipos de frutas pode ser encontrada dentro de uma única família de plantas, incluindo frutas carnudas, como bagas, pomos e drupas, bem como estruturas de frutas secas, como aquênios, cápsulas e folículos. Que princípios evolutivos permitem que transformações tão grandes ocorram em um período de tempo tão curto? Este ainda é um tópico importante na biologia vegetal hoje (DARDICK e CALLAHAN, 2014).

Os frutos são classificados em dois tipos: frutos secos e frutos carnosos. Supõe-se que os frutos secos antecedem os frutos carnosos e são frequentemente distribuídos por processos físicos (SCUTT et al., 2006). Quando as sementes se desenvolvem, elas são descarregadas das vagens, levadas pelo vento ou se agarram às superfícies dos animais para transporte. Como formas de dispersão de sementes tempos a zoocoria – que é realizada por aves

(ornitocoria), mamíferos (mamalocoria), répteis (saurocoria), peixes (ictiocoria) e formigas (mirmecoria). A ornitocoria – que é a principal forma de dispersão de sementes em florestas tropicais, é dividida em três subclasses: epizoocoria, sinzoocoria e endozoocoria (DÁRIO, 2006).

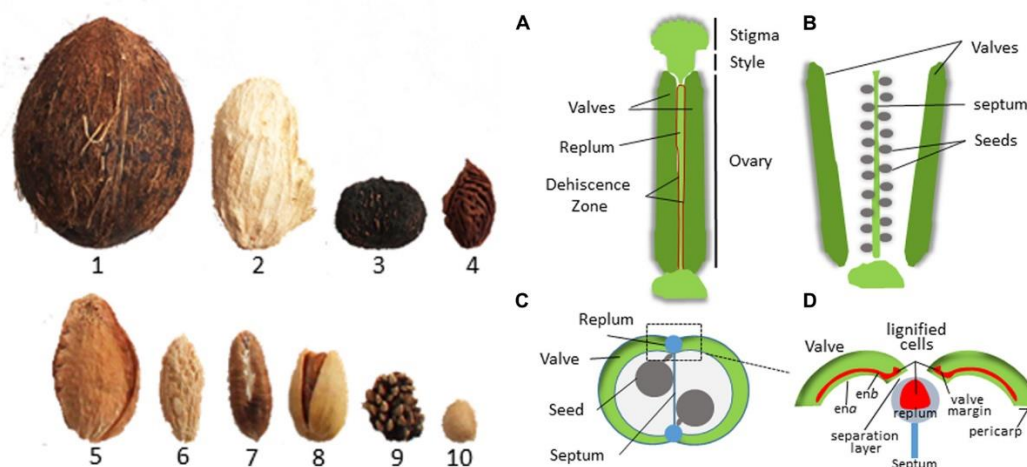
Uma pesquisa publicada na *Current Biology* por Muoz-Rodriguez et al., (2018) fornece evidências sólidas de DNA de que a ideia de Heyerdahl é errônea em que como a batata-doce chegou à Polinésia antes de os europeus chegarem à América do Sul, onde a planta se desenvolveu. Este estudo recente revela que as sementes de batata-doce fluíram através do Oceano Pacífico em correntes marítimas há mais de 100.000 anos, descartando o movimento humano. Espécies de *Ipomoea* com boas sementes à deriva incluem *I. pes-caprae* (MUOZ-RODRIGUEZ et al 2018).

Além da proteção e dispersão das sementes, o endocarpo também desempenha um papel importante na sustentação e comunicação com as sementes em desenvolvimento, nos frutos secos, desempenham um papel importante na dispersão das sementes.

Podem ser deiscentes – quando vagem é aberta à força pela tensão física interna que se acumula durante a maturação do fruto, fazendo com que as sementes sejam descarregadas e indeiscentes – encontradas em nozes, girassóis e tipos de sementes trazidas pelo vento, como as sementes aladas encontradas em estruturas do tipo bordo e cinzas ou cipsela produzidas por dentes de leão, isso se dá devido a diferenciação do endocarpo e das camadas especializadas de tecidos adjacentes do mesocarpo regula a quebra das vagens.

Na fig. 27a Frutos com endocarpo endurecido são chamados de drupas. Em frutos deiscentes, fig.27b, a diferenciação do endocarpo e das camadas especializadas de tecidos adjacentes do mesocarpo regula a quebra das vagens (DARDICK; CALLAHAN, 2014).

Figura 27 – Frutos em que as sementes estão contidas dentro e não são mostradas



Fonte: (DARDICK e CALLAHAN, 2014)

2.5.4 Proteção, Resistencia e absorção contra choques mecânicos

Nesse tópico foram evidenciados os 22 estudos advindos da revisão sistemática que tiveram como critério de escolha a o desenvolvimento bioinspirado através de frutas para absorção de energia ou estudos de resistência à impactos ou choques mecânicos.

A morfologia estrutural ocorre em três níveis: global (sistema estrutural), local (componente estrutural) e micro (material). O “layout” ideal, a interação entre a forma ou morfologia, a estrutura e o material estrutural, são os ingredientes fundamentais para a Otimização de Estruturas Baseada no Desempenho. O “layout” da estrutura neste contexto inclui informações sobre a topologia, forma e dimensionamento dos componentes estruturais, bem como a materialidade. A abstração e categorização da essência das técnicas de otimização na natureza fornecem uma visão geral das estratégias gerais para processos de otimização abordando vários problemas ao mesmo tempo. É também o ponto de partida para métodos simplificados de estimativa computacional (STACH, 2010).

Por suas propriedades geométricas, a esfera é a forma ideal de proteção. De fato, é o corpo espacial que possui o maior volume por unidade de área. É a forma associada ao estado latente, o estado de espera, devido à sua relação

com a função protetora. Toda forma de vida começa com uma configuração esferoidal. O óvulo tem uma forma esferoidal e um potencial de vida que é ativado pela fertilização. Uma vez iniciado esse processo, o óvulo fertilizado mantém uma forma global que se assemelha a uma esfera em vários estágios de desenvolvimento. Ovos de aves e répteis são semelhantes em forma: a gema é esférica e cercada por um líquido claro e protetor. Tudo está envolto em uma casca esférica rígida (BROECK, 2018).

Nos vegetais, as sementes esferoidais são protegidas pela polpa do fruto que as nutre, e esta última é igualmente protegida pela casca do fruto. Somente quando as condições externas são compatíveis com o plano de desenvolvimento é que as sementes ou os ovos iniciam o processo de "desenrolamento" que os levará ao seu destino final. Deixam para trás sua forma esferoidal, adotando padrões de desenvolvimento e crescimento (BROECK, 2018).

Algumas cascas de frutas e cascas de algumas árvores e lianas têm excelente tolerância a danos e absorção de energia. No caso dos frutos, a estrutura externa (casca) protege as porções internas (sementes e polpa do fruto) 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. algumas lianas). (VAN BREUGEL, K., KOLEVA, D., & BEEK, T. VAN, 2018).

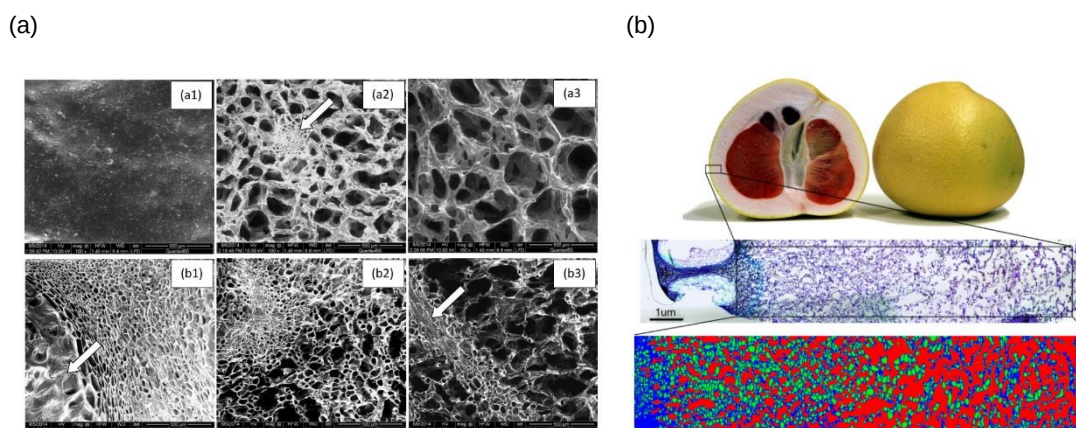
2.5.4.1 Pomelo – *Citrus maxima*

Pomelo é a maior fruta do gênero *Citrus* com frutos de peso de até 6 kg e com altura máxima das árvores frutíferas chegando aos 15m. Esses dois fatores combinados, peso do fruto e altura, somados causam um grande potencial de energia. A fruta ao se desprender de grandes alturas, a energia estática é convertida em energia cinética que tem seu valor máximo atingido antes do impacto ao solo. O fruto do pomelo é o que possui maior número de publicações

envolvendo absorção de energia, devido as suas propriedades mecânicas, encontradas na sua casca (SEIDEL et al., 2010).

Segundo Fischer et al. (2010), essa resistência ao impacto se deve a organização hierárquica da casca do fruto, denominado pericarpo, bem acentuada, que permite o fruto cair de 10m de altura e não sofra danos externos severos, preservando assim sua estrutura, um exemplo notável de resistência. A casca de pomelo com 2 a 3 cm de espessura, chamada pericarpo, provavelmente é responsável por uma proporção significativa da dissipação de energia. É composto por diferentes tecidos biológicos, consistindo em uma epiderme externa, o exocarpo (denominado flavedo), que contém as glândulas sebáceas, e o mesocarpo esponjoso branco (denominado albedo), a maior parte da casca. Na fig. 28a temos Micrografias MEV de seção transversal e fig. 28b seção longitudinal: 1) exocarpo (flavedo), 2) mesocarpo (albedo) próximo ao flavedo e 3) mesocarpo.

Figura 28 – (a) MEV da Citrus máxima. (b) Análise do material dentro da parede do pomelo



Fonte: (adaptado de Seidel et al. (2010); (b): Looyrach et al. (2015)

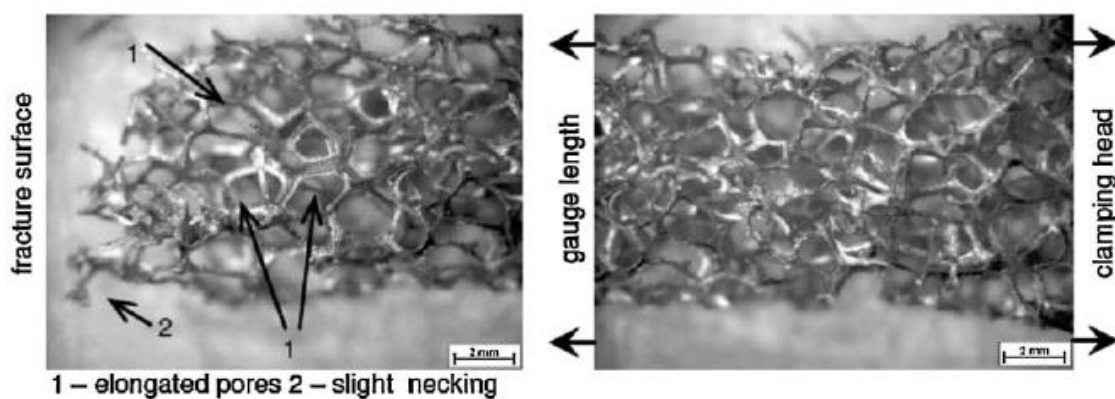
A natureza desenvolveu essa estratégia para absorção contra impacto para preservar o fruto e mantê-lo intacto ao colidir com o solo após cair de alturas elevadas, caso contrário, o fruto pereceria em pouco tempo devido ao clima tropical ao qual é comumente encontrado (FISCHER et al., 2010).

De acordo com Speck et al. (2018) a microscopia de luz ainda é indispensável para a análise da estrutura interna e da forma externa das plantas como, por exemplo, o curso e o arranjo dos feixes fibrosos. Este método provou

ser altamente útil, pois permite não apenas mapear o interior e estruturas externas de uma planta, mas também para a realização de experimentos biomecânicos.

Fischer et al. (2010) apresentam como modelo bioinspirados uma espuma de metal com melhor resistência ao impacto inspirada na estrutura da casca do Pomelo. Através de avaliação mecânica e análise estrutural do modelo biológico houve a transferência de características estruturais do pericarpo do pomelo pra desenvolvimento de estruturas bioinspiradas. Dessa forma, estruturas foram desenvolvidas e processadas. O processo de fundição de investimento modificado e o modelo de liga Bi57Sn43, apresentado na fig. 29, provaram ser excelentes candidatos para fazer essas estruturas bioinspiradas.

Figura 29 – Microestrutura próxima à superfície de fratura de um corpo de prova carregado por tensão (esquerda) em comparação com a área não deformada do mesmo corpo de prova (transição do comprimento de referência para a cabeça de fixação; direita)

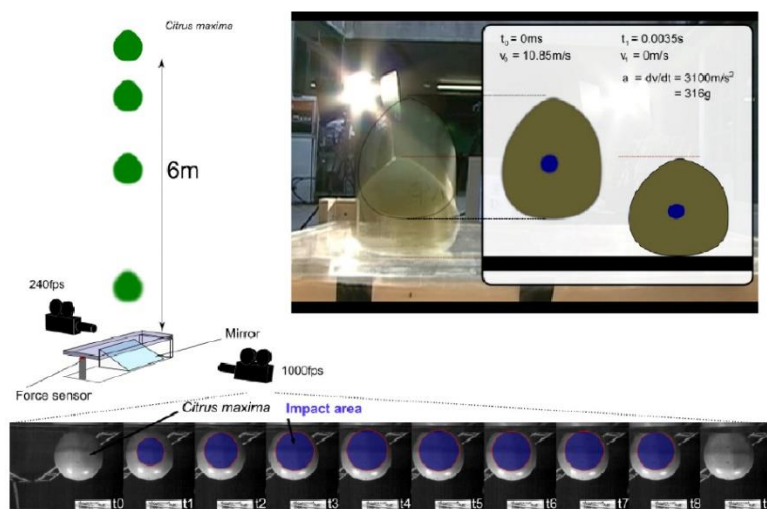


Fonte: Fischer et al., (2010)

Seidel et al. (2010) apresentam um estudo controlado de queda livre do fruto do Pomelo e registrado por câmera de alta velocidade, conforme a fig. 30, para análise da desaceleração, assim como a dissipação de energia na hora do impacto. Afirmam que a estrutura e material em construções biológicas produz uma camada de proteção totalmente funcional proteção totalmente funcional, inspirada na casca do Pomelo permite desenvolver novos materiais com estruturas mais leves de alto impacto e resistência ao choque, para combinação de alta dissipação de energia e recuperação quase completa de grandes deformações. Os autores afirmam que diversos caminhos podem ser usados para alcançar alta dissipação de energia.

A *Citrus maxima* apresenta em suas estruturas hierárquicas diversas combinações em diferentes níveis estruturais e materiais biológicos que fazem uso de espumas celulares, estruturas esponjosas, laminados e fibras. Com essa transferência das propriedades biológicas têm-se aplicações potenciais para espumas reforçadas com fibra resistente ao impacto biomimético são embarcações para transporte de mercadorias perigosas, explosivos, desenvolvimento de capacetes, vestuários de proteção, proteção contra impactos de veículos (SEIDEL et al., 2010).

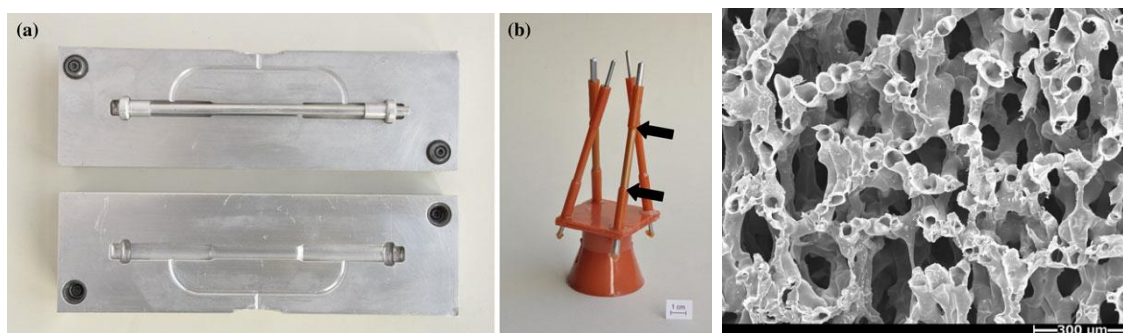
Figura 30 – Experimento de queda livre da *Citrus maxima*



Fonte: (SEIDEL et al., 2010)

Fischer et al. (2013) relatam um estudo envolvendo as estruturas hierárquicas da casca do Pomelo foram reveladas através de exames microscopia eletrônica (MEV) da sua estrutura. As amostras foram compradas em uma loja local e algumas foram excisadas com orientação radial em relação ao eixo longitudinal do fruto foram extraídas da casca. As amostras tinham um comprimento na direção radial de 14,4 mm e um comprimento de borda de 5,5 mm. Com o estudo, foi desenvolvida uma produção e investigação de um metal bioinspirado - metal compósito inspirado (baseado na casca do pomelo). Através da capacidade da casca fruto do pomelo de absorver energia de impacto, o projeto de um suporte (fig. 31) é abstraído e transferido para composto de alumínio / alumínio - liga de silício (A356).

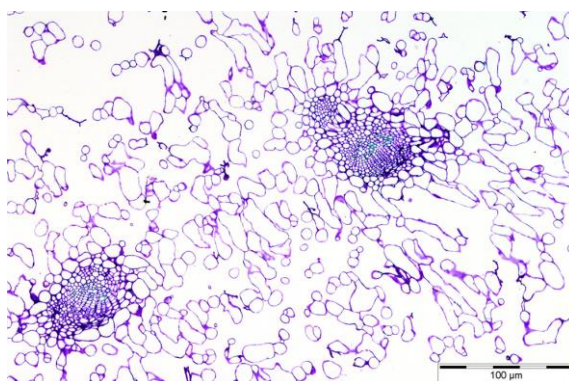
Figura 31 – (a) Matriz de alumínio para a moldagem. (b) Conjunto com hastes de alumínio puro. (c) Esquerda. Imagem MEV do mesocarpo do pomelo



Fonte: Fischer et al. (2013)

Thielen et al. (2013) afirmam que *Citrus maxima* tem uma casca espessa semelhante a uma espuma que é capaz de dissipar quantidades consideráveis de energia cinética e, portanto, o Pomelo representa um modelo ideal para o desenvolvimento de estruturas de amortecimento de impacto biomimético. Essas descobertas levam à discussão da casca de pomelo como inspiração para espumas metálicas fundidas reforçadas com fibra com capacidade para excelente dissipação de energia.

Figura 32 – Parte de uma seção fina corada com toluidina de 3 μm de espessura da casca de pomelo mostrando dois feixes vasculares cortados perpendicularmente ao seu eixo de comprimento



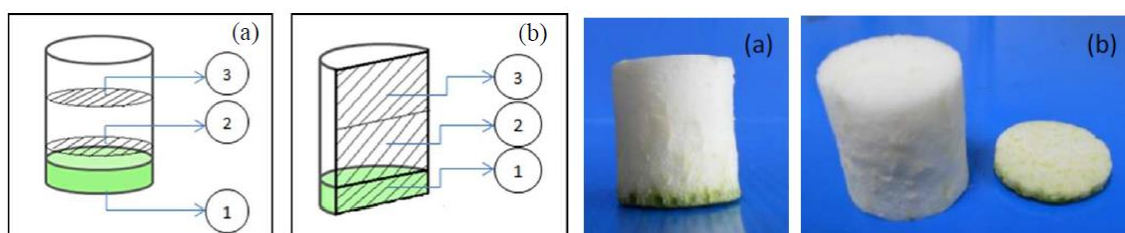
Fonte: Thielen et al. (2013)

De acordo com a imagem a casca do pomelo, implica que as tensões compressivas podem ser distribuídas sobre volumes maiores de espuma. Os reforços de fibra também representam uma possibilidade interessante e

promissora de alterar e otimizar o comportamento mecânico de espumas técnicas, conectando várias escoras da espuma, o que nos permite distribuir forças atuando localmente em volumes maiores.

Um estudo de investigação das propriedades de cascas de pomelo de três variedades foram investigadas por Looyrach et al. (2015). A variedade mostrou efeito um tanto significativo nas propriedades físicas e mecânicas. O Pomelo por apresentar casca espessa com alto teor de umidade (75-80%) e atividade de água (0,90-0,98), o peso da casca representou quase metade do peso total do fruto. Além disso, a propriedade mais importante da espuma de embalagem é a capacidade de absorver energia durante o impacto, que pode ser caracterizada por meio da medição da deformação inicial de densificação. O estudo indica que propriedades mecânicas encontradas na casca do Pomelo são muito promissoras para espumas de embalagem ecológica. Na fig.33 a esquerda, três diferentes áreas da casca do pomelo foram determinadas em cortes transversais e longitudinais. Na direita, apresentam as cascas de pomelo com e sem exocarpo, cortadas em cilindros com uma broca de cortiça com diâmetro interno de 20 mm.

Figura 33 – (Esquerda) Três áreas de (a) corte transversal e (b) corte longitudinal mostrando (1) exocarpo (flavado), (2) mesocarpo (albedo) próximo ao flavado e (3) mesocarpo próximo à carne. (Direita) Amostras cilíndricas cortadas por broca de cortiça (a) com e

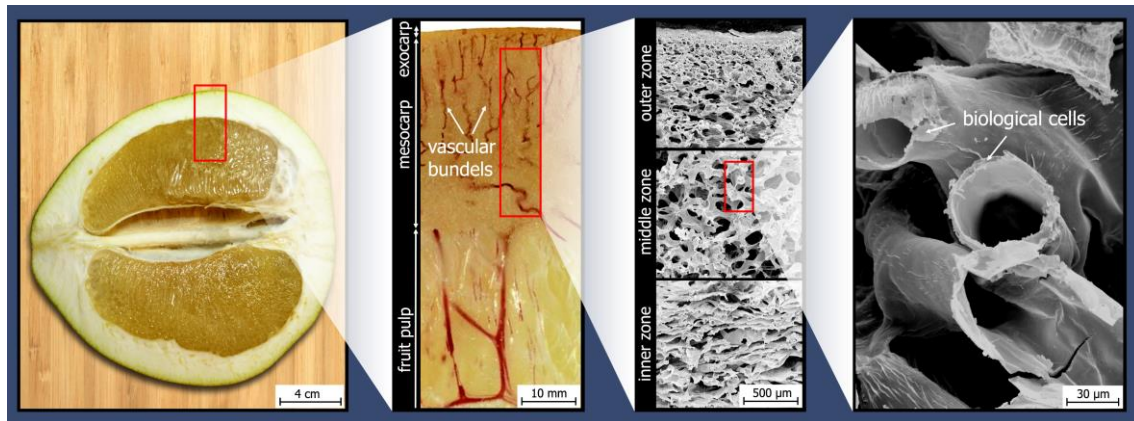


Fonte: Looyrach et al. (2015)

Ortiz et al. (2018) desenvolveram um modelo de espuma bioinspiradas no estudo da casca do Pomelo (fig. 34). Foi-se gerada uma estrutura de células abertas esqueléticas das espumas bioinspiradas usando mosaico de Voronoi. Foi desenvolvido um código Python (fig.35) para ler as coordenadas de vértices de células (pontos de borda) e remover os segmentos de fio duplicados e os segmentos de fio que estão abaixo de um valor de tolerância, em que foi

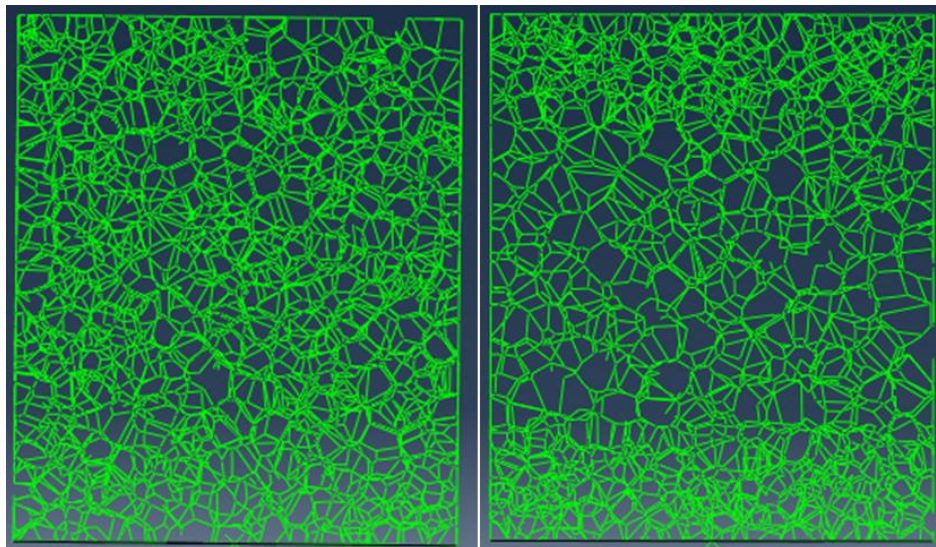
modelado para obter os elementos finitos em escala real. Em seguida, fez-se análise quase estática e dinâmica da espuma bioinspiradas (fig. 34).

Figura 34 – Composição do pericarpo do pomelo



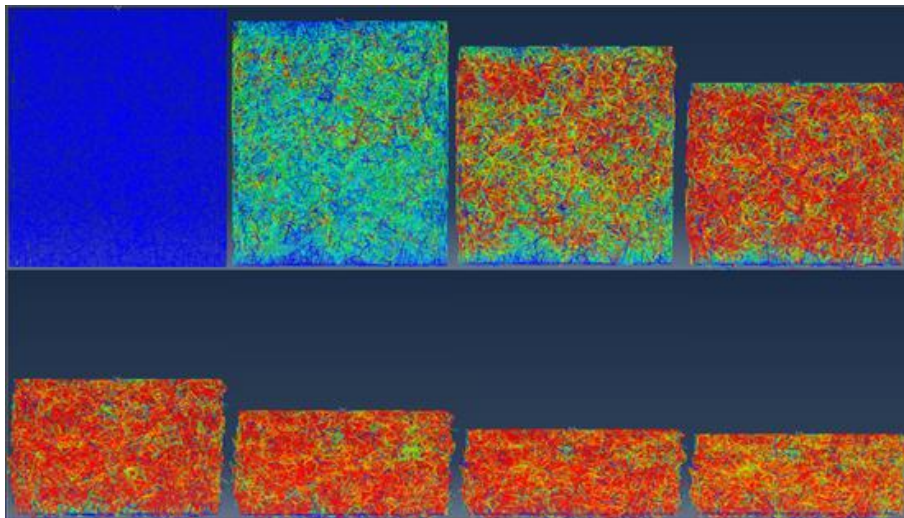
Fonte: Ortiz et al. (2018)

Figura 35 – Comparação na seção transversal de uma amostra de porosidade uniforme (esquerda) e amostra com porosidade gradiente (direita)



Fonte: Ortiz et al. (2018)

Figura 36 – Contorno de tensão do corpo de prova com porosidade uniforme sob compressão quase estática

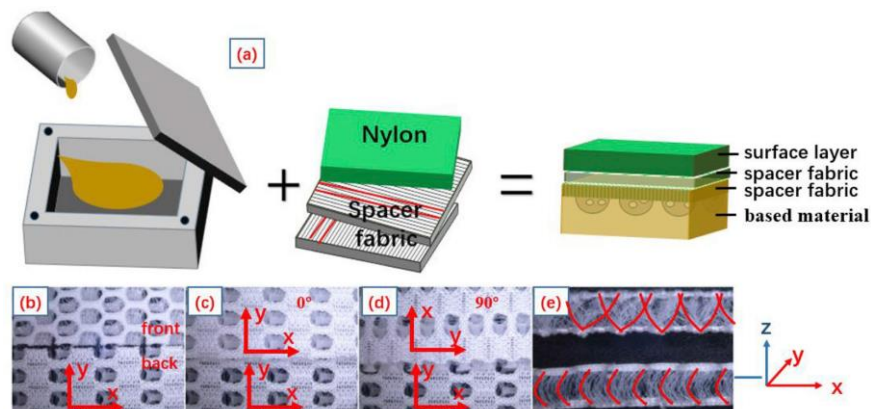


Fonte: Ortiz et al. (2018)

Wang et al. (2018) combinaram volume digital correspondente (DVC) e a técnica de imagem tomográfica de raio-x e no estudo foram realizados testes de compressão uniaxial para quantificar a evolução da morfologia interna e as respostas cinemáticas de amostras da casca do pomelo durante a compressão. Por meio desses experimentos, as características de microestrutura do mesocarpo para exocarpo são examinadas com base nos resultados experimentais, dessa forma as propriedades mecânicas foram relacionadas e reveladas para entender a relação entre as propriedades mecânicas e as características micro estruturais de sua casca. A arquitetura celular encontrada fornece excelentes propriedades como: a capacidade de amortecimento e absorção de energia eficiente.

Li et al. (2019) desenvolveram um estudo inspirado na casca do pomelo que propõe o desenvolvimento de compósitos de espuma bioinspirados, que são preparados a combinação de diferentes estruturas encontradas no tecido (fig.37). Os compostos bioinspirados são avaliados em termos de resistência à compressão, resistência à queda e eficácia de amortecimento, examinando dessa forma o mecanismo das estruturas. Os resultados experimentais indicam que os compósitos bioinspirados apresentam funções superiores devido ao reforço de um tecido de náilon, bem como alta rigidez e absorção de energia dos tecidos espaçadores de malha pequena à base de uretano.

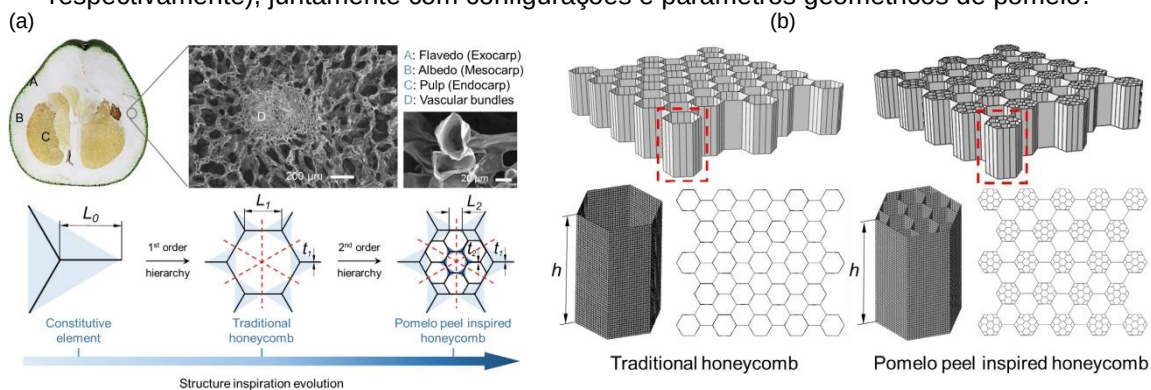
Figura 37 – (a) Diagrama de processamento e imagens de (b) superfície, (c) laminação, (d) laminação e (e) fios constituintes de tecidos espaçadores



Fonte: Li et al. (2019)

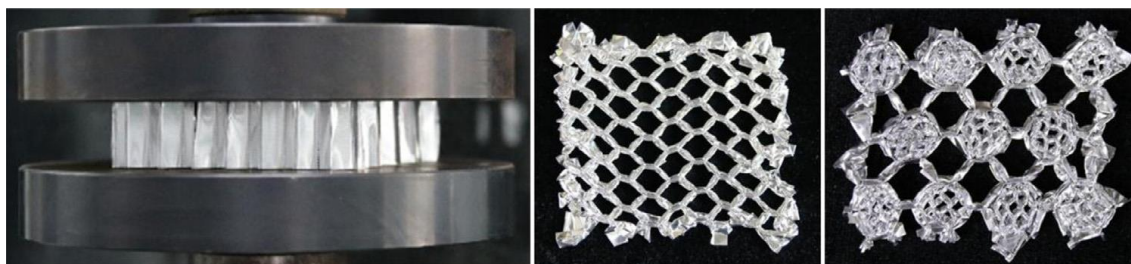
Zhang et al. (2019) demonstraram que a hierarquia estrutural da casca do Pomelo desempenha um papel crítico na otimização da resistência ao esmagamento e absorção de energia. O proposto estudo desenvolveu uma nova estrutura hierárquica baseada na estrutura hexagonal e investigou a resistência ao esmagamento, juntamente, com estudo de modelo finito, as capacidades de absorção de energia, através de uma abordagem analítico-numérica integrada foi desenvolvida. Os resultados mostraram-se promissores (fig. 38) com a estrutura bioinspiradas desenvolvida e pode apresentar uma nova perspectiva sobre o fornecimento de propriedades mecânicas superiores de materiais celulares naturais e oferecem insights para aplicações de materiais bioinspirados.

Figura 38 – (a) Diagramas multi-escala e MEV para representar microestruturas detalhadas de casca de pomelo típica (A, B, C e D representam flavedo, albedo, polpa e feixes vasculares, respectivamente), juntamente com configurações e parâmetros geométricos de pomelo.



Fonte: ZHANG et al. (2019)

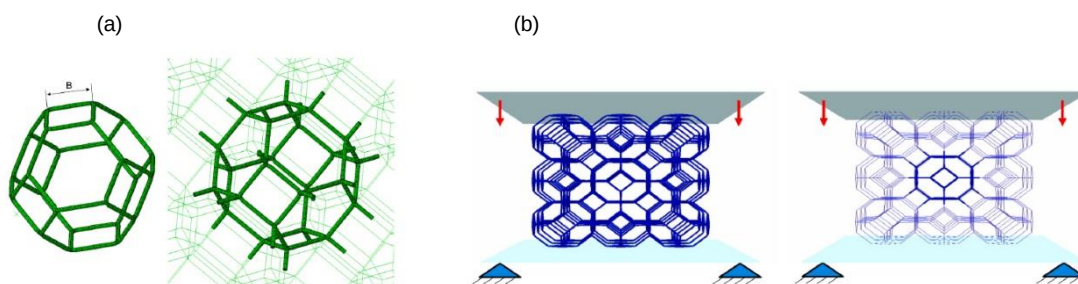
Figura 39 – Teste de compressão e modo de deformação representativo do favo de mel tradicional e do favo de mel inspirado em casca de pomelo, onde o padrão de dobra progressiva desejado foi observado nos testes



Fonte: ZHANG et al. (2019)

Schäfer et al. (2020) desenvolveram uma espuma homogênea de alumínio (AlSi7Mg0.3), através das características estruturais da casca do Pomelo que permite a dissipação de grandes quantidades de energia durante o impacto. Foi realizado um estudo de modelo numérico (fig. 40a) em diferentes níveis hierárquicos por meio do de Métodos de Elementos Finitos (FEM), a fim de identificar diferentes características estruturais que contribuem para o desempenho de amortecimento do fruto do pomelo (fig. 40b). Os resultados da simulação por meio dos modelos experimentais de compressão demonstraram resultados promissores quanto a deformação, fornecendo modelo promissor para o desenvolvimento de espumas metálicas biomimética. Dessa forma os autores concluem que a análise de sistemas biológicos permite a construção de novos materiais bioinspirados leves e com resistência ao impacto, com uma combinação alta de dissipação de energia, amortecimento e recuperação significativa de deformações.

Figura 40 – Representative load-displacement curve



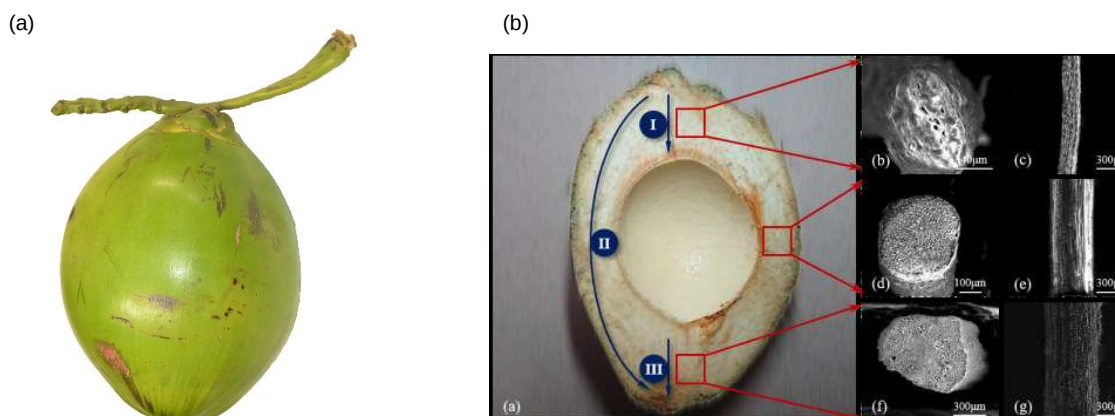
Fonte: Schäfer et al. (2020)

2.5.4.2 Coco – *Cocos nucifera*

Lu et al. (2019) revelaram em seu estudo a estrutura presente nas fibras dos Cocos (fig.41a) para resistência ao choque e absorção de energia. Em seguida foi desenvolvido um modelo bioinspirados e validado pelo pelos cálculos numéricos para fornecimento de um composto funcional. A estrutura do *Cocos nucifera* apresentou uma excelente resistência ao choque com apresentação de multiescala, incluindo seu pericarpo macroscopicamente organizado e mesocarpo microscópico desordenado, este último, possuindo a camada mais espessa entre as três camadas do pericarpo. O coco foi cortado e observado, como mostra a Fig. 41b. O endocarpo é uma camada fina e densa. O exocarpo é uma camada de fibra mais fina. Todas as fibras de coco crescem quase do pedículo ao fundo em macroescala. A orientação das fibras é sempre axilar ou próxima a axila.

No estudo foram realizados experimentos de queda livre (fig. 43) e quase estáticos para descrição do arranjo da fibra do coco (fig. 42) e modelos numéricos computacionais foram construídos para análises. Através desse estudo revelou-se que a orientação da fibra do fundo do fruto do coco pode aumentar a capacidade de absorção de energia e o arranjo das fibras podem influenciar a propagação da onda de estresse para proteção do endocarpo do fruto.

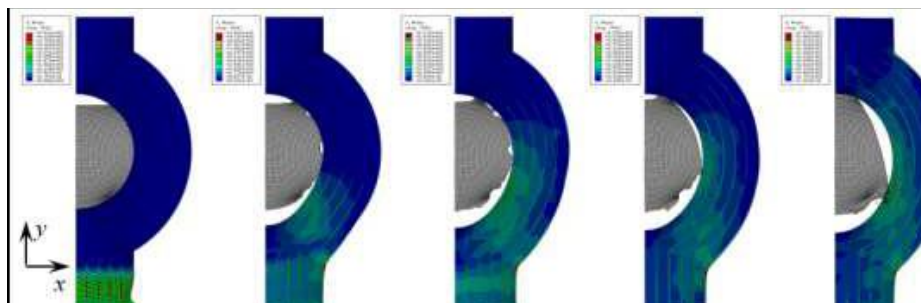
Figura 41 – (a) Coco. (b) A vista em corte do fruto do coco, as linhas azuis com setas



Fonte: Lu et al. (2019)

A Fig.42 é o esquema do modelo de simulação. O modelo FE foi simplificado para um modelo axissimétrico, conforme mostrado na figura e a fibra e a matriz foram modeladas com diferentes materiais. A onda de impacto foi exercida na parte inferior do modelo para simular a colisão entre o fruto do coco e o solo.

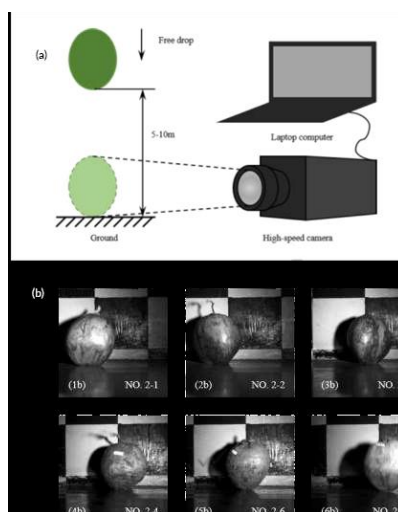
Figura 42 – O resultado da simulação de Elementos finitos



Fonte: Lu et al. (2019)

Na fig. 43 observa-se mostra que a parte inferior do fruto do coco é sempre a parte de contato durante os experimentos de queda livre. O experimento de queda livre foi conduzido para investigar os pontos de impacto do coco (simulando sua queda na natureza). Os frutos foram mantidos em seu pedículo de 5 a 10 metros de altura do solo na mesma orientação para imitar a posição de suspensão na árvore e, em seguida, liberados sem velocidade inicial ou inclinação, conforme mostrado abaixo.

Figura 43 – O esquema dos experimentos de queda livre; b. cocos batendo no chão durante experimentos de queda livre

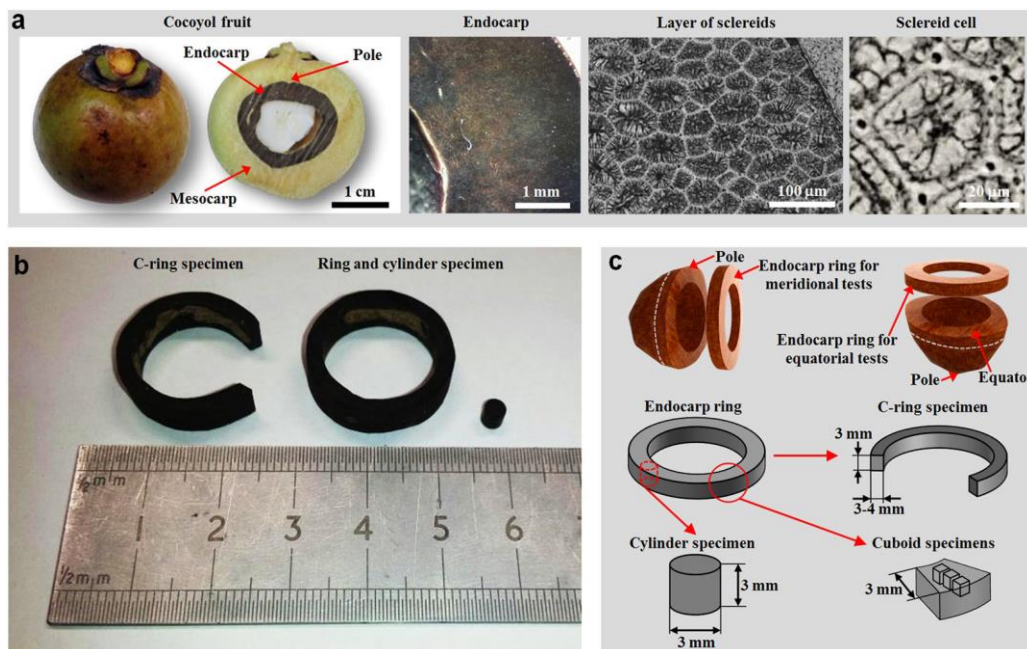


Fonte: Lu et al. (2019)

2.5.4.3 Macaíba – *Acrocomia mexicana*

A Fruta da palmeira chamada cocoyol (macaíba, macaúba) é comumente encontrado na Península de Yucatán, no México. Flores-Johnson et al. (2014) realizaram um estudo das propriedades mecânicas e da microestrutura em diferentes condições de secagem do endocarpo do fruto Cocoyol da palmeira *Acrocomia Mexicana* (fig. 44) com trinta e seis frutos de tamanhos semelhantes. Com a microscopia óptica e eletrônica de varredura de cortes transversais da região equatorial revelou que o endocarpo apresenta estrutura hierárquica complexa. As micrografias mostraram que a estrutura é feita de feixes de tubos orientados aleatoriamente e células em forma de bolha, mostrando uma rede emaranhada de microcanais ocos, que são da ordem de dezenas de microns. Os resultados e a microestrutura aqui apresentados encorajam pesquisas futuras para materiais artificiais bioinspirados.

Figura 44 – Frutos de cocoyol e espécimes de endocarpo. (a) Estrutura hierárquica do endocarpo de Cocoyol. (b) Amostras para análise microscópica e ensaios mecânicos. (c) Detalhes geométricos dos espécimes



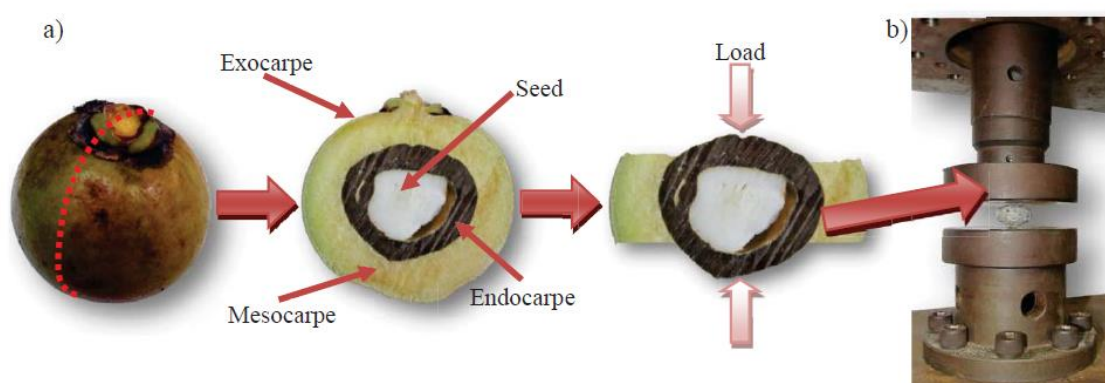
Fonte: Flores-Johnson et al. (2018)

Na fig. 44a observa-se a estrutura hierárquica da fruta macaíba em diferentes escalas de comprimento. A seção transversal do fruto mostra suas

partes constituintes. O corte transversal do endocarpo mostra que sua microestrutura consiste em células do esclerênquima. Amostras usadas para estudos de microscopia e caracterizações mecânicas obtidas do endocarpo são mostradas na Fig. 44b, c e detalhadas na seção de Métodos, onde também é especificado o número de amostras usadas para cada condição de teste (FLORES-JOHNSON et al., 2014).

Alguns estudos foram realizados (conforme a fig.45) para medir a força necessária para quebrar, a fim de compreender o comportamento da fratura e a resistência à fratura pode ser influenciada pelo tamanho e forma da casca, essas propriedades mecânicas intrínsecas nesse fruto é a estratégia desenvolvida pela natureza para proteção de suas sementes contra os predadores Flores-Johnson et al. (2018). Na fig. 46 mostra-se o exame de superfície das amostras foi realizado usando um microscópio óptico em duas diferentes ampliações – Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 45 – (a) Corte transversal do fruto de Cocoyol para teste de compressão; b) Configuração de testes de compressão

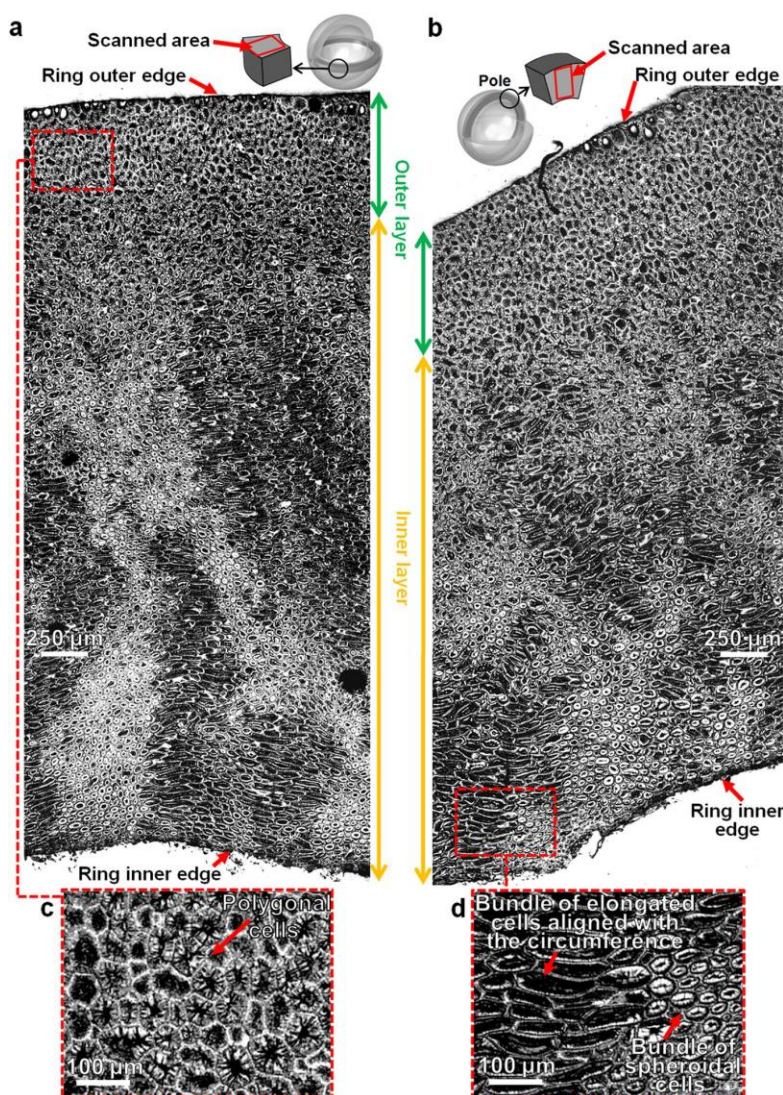


Fonte: Flores-Johnson et al. (2014)

A observação do endocarpo do fruto foi obtida com seções transversais do fruto e foram investigadas usando microscópio óptico em duas ampliações diferentes. Imagens ópticas típicas de cortes transversais tanto no plano equatorial (Fig. 46a) quanto no plano meridional (Fig. 46b), mostram que há pouca variação da distribuição das células entre essas duas direções. A microestrutura constituída por células do esclerênquima não varia sistematicamente com a posição radial; no entanto, duas camadas principais de células (camada externa e camada interna na Fig. 46a, b) sem limite claro entre

elas podem ser identificadas ao longo da espessura do anel na direção radial. A transição entre essas duas camadas é gradual; no entanto, algumas características distintas podem ser identificadas para cada camada. Na camada externa, que fica próxima à borda externa, as células têm formato poligonal (Fig. 46c) e parecem ser densamente empacotadas e dispostas de forma compacta, sem espaço óbvio entre elas (FLORES-JOHNSON et al., 2018).

Figura 46 – Micrografias ópticas do endocarpo do fruto de Cocoyol. (a) Corte transversal do endocarpo do fruto no plano equatorial. (b) Corte transversal do endocarpo do fruto no plano meridional. (c-d) Vistas de perto



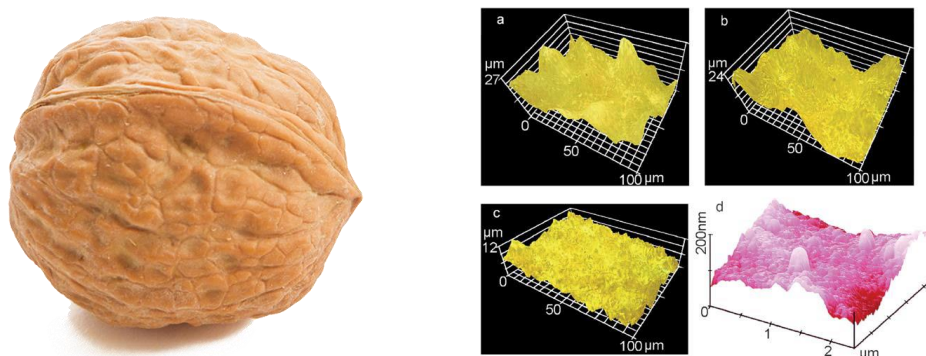
Fonte: Flores-Johnson et al. (2018)

2.5.4.4 Noz – *Juglans regia*

Kaupp et al. (2011) apresentaram um estudo mecânico das cascas duras de nozes ou sementes. As cascas duras selecionadas de nozes e sementes cobrem uma ampla gama de diferentes estruturas como: a cereja madura de *Prunus avium*, nozes de *Juglans regia*, avelãs de *Corylus colurna* e faia de *Fagus sylvatica* da Alemanha. Pistachios de *Pistachio fandooghi*, *Pistachio akbari* e *Pistachio ghoochi* foram colhidos no Irã, macadâmias de *Macadamia ternifolia* em Hilo, Havaí e *Bertholletia excelsa* na floresta tropical do Brasil.

A investigação combinada com três técnicas modernas revelou pelo menos quatro modelos bioinspirados (fig 46). A microscopia 3D e AFM (A microscopia de força atômica é uma das modalidades de uma vasta família de microscopias derivadas a partir da ideia do chamado microscópio de tunelamento) são usadas para visualizar a rugosidade das superfícies não tratadas e identificar áreas adequadamente planas e a homogeneidade em relação à escala de comprimento. A casca dura externa de *J. regia* não revela fibras na fratura meridional e latitudinal das superfícies, mas células ligeiramente alongadas. A áspera concha exhibe regiões suficientemente planas para recuo vertical.

Figura 47 – (Esq.) Imagem da Noz. (Dir.) Micrografias em perspectiva de uma casca de noqueira externa: (a) superfície de fratura meridional e (b) latitudinal mostrando células levemente alongadas; (c) micrografia da superfície externa; (d) Topografia AFM



Fonte: Google imagem. Retirado de Kaupp et al. (2011)

2.5.4.5 Noz-pecã – *Carya illinoensis*

A casca dura externa de *C. illinoensis* (fig. 48) revela células quase isodiamétricas nas superfícies fraturadas semelhantes a *J. regia*.

Figura 48 – Fruto noz-pecã



Fonte: google imagem

2.5.4.6 Pistáchio – *Pistachio fandonchi*

O *P. fandonchi* (*P. akbari* ou *P. ghoochi*) fig. 49a revela uma estrutura quase isodiamétrica com asperezas do tamanho de um micrômetro ao seu redor, como mostrado na figura 49b abaixo.

Figura 49 – (Esq.) Imagem do fruto pistácio. (a) projeção da superfície da fratura meridional mostrando células altamente estruturadas. (b) Micrografias de *P. fandonchi*; (b) micrografia em perspectiva de uma superfície de fratura latitudinal; (c) micrografia

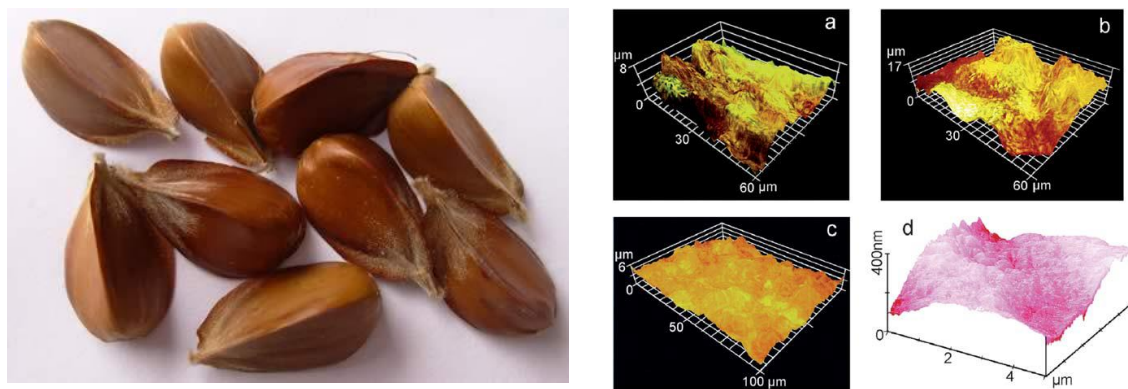


Fonte: Kaupp et al. (2011)

2.5.4.7 Nozes de faia – *Fagus sylvatica*

A noz de *F. sylvatica* (fig 50) exibe uma forma amplamente piramidal e a casca é fina (cerca de 150 μm). Células elipsoidais com comprimentos de 25-30 μm são vistas em superfícies de fratura meridional.

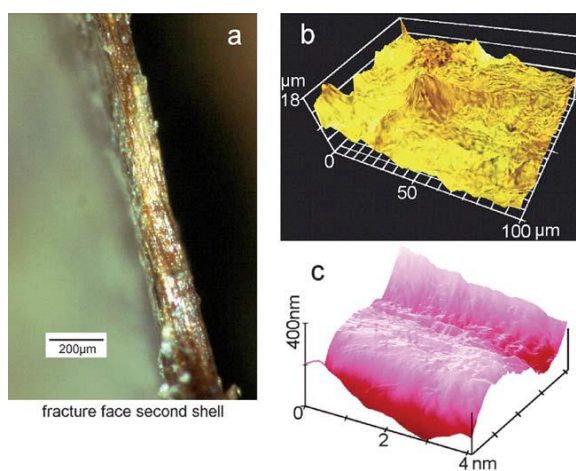
Figura 50 – Micrografias em perspectiva de uma casca de noz de faia: (a) superfície de fratura meridional mostrando os lados mais longos das células; (b) superfície de fratura latitudinal mostrando as extremidades das células; (c) micrografia de superfície externa



Fonte: Kaupp et al. (2011)

A segunda casca de *J. regia* é fina (fig. 51^a tem cerca de 100 μm), marrom escuro e não firmemente conectado ao exterior. Fibras tangenciais densamente compactadas paralelas longas são mostradas na superfície de fratura.

Figura 51 – Micrografias da segunda casca de noz: (a) superfície de fratura mostrando fibras tangenciais; (b) micrografia de superfície externa em perspectiva; e (c) topografia AFM de uma parte da superfície externa com locais de cume



Fonte: Kaupp et al. (2011)

2.5.4.8 Castanha – *Bertholletia excels*

A castanha do Brasil (fig. 52), *B. excelsa*, tem uma forma de gangorra de três gumes e pode ser considerada difícil de quebrar, mas a quebra ainda é possível com quebra-nozes comuns. Possui uma arquitetura de cinco camadas altamente estruturada. A superfície externa é rugosa, formando ilhas acidentadas que tocam cada outra.

Figura 52 – Micrografias de uma casca dura da castanha (esq.): (a) superfície de fratura mostrando as camadas externa exibindo todas as fibras normais à superfície; (b) projeção da superfície 3D externa em baixa ampliação; (c) micrografia de superfície externa em perspectiva; e (d) AFM topografia de uma superfície externa com sítios de cume que requerem ponta de penetrador íngreme e afiada

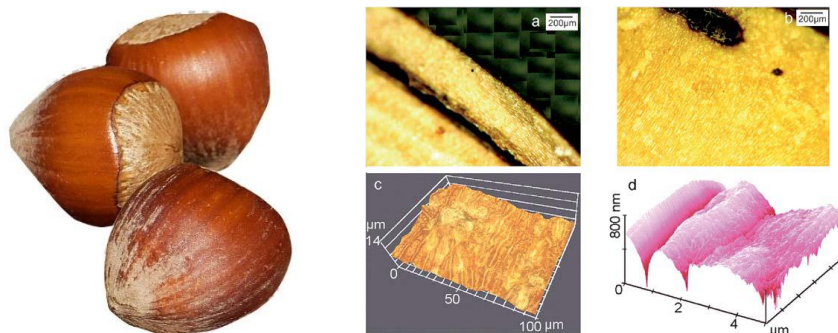


Fonte: Kaupp et al. (2011)

2.5.4.9 Avelã – *Bertholletia excelsa*

A casca dura externa de *C. columna* exibe células de fibras tangenciais curtas, enquanto a terceira casca com algumas conexões com a primeira casca tem as fibras curtas normais. As fibras externas são vistas no gráfico 3D microscópico em perspectiva e na topografia AFM. Claramente, as fibras curtas externas são locais úteis para nanoindentação sob controle AFM.

Figura 53 – Micrografias de uma casca dura de avelã: (a) superfície de fratura meridional mostrando duas camadas separadas, a camada externa exibindo fibras tangenciais curtas; (b) superfície de fratura latitudinal em um sítio de conexão com fibras curtas normais à superfície apenas na camada interna; (c) micrografia de superfície externa em perspectiva; e (d) topografia AFM da superfície externa com sítios de cume nas fibras



Fonte: Kaupp et al. (2011)

2.5.4.10 Amêndoa – *Prunus dulcis*

A amêndoa (fig. 54) é mais difícil de quebrar do que todas as outras nozes / sementes apresentadas, com a exceção da macadâmia. Possui um sistema elaborado de três camadas com orifícios de 70-170 μm de largura e 90-330 μm de profundidade e orifícios muito profundos ($> 1 \text{ mm}$), canais ao longo do eixo principal (1,3-2,2 mm de profundidade) e duas poderosas camadas rígidas (0,9 - 1,5 e 0,9–1,2 mm) que são separados por uma capa mole de proteção, tem motivos suficientes para a resposta elástica.

Figura 54 – Amêndoas

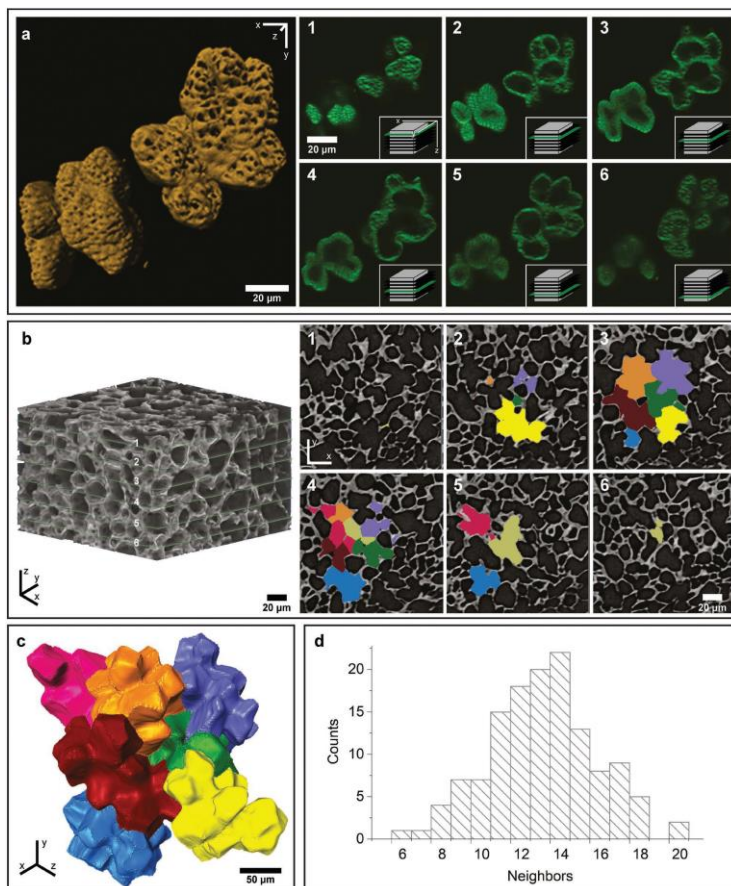


Fonte: google imagem

O arranjo 3D dessas células “polylobate” é confirmado por nanotomografia de raio-x da concha. As células segmentadas (Fig. 55). revelado pela primeira

vez em 3D (Figura 55c). Cada uma das “células polilobadas” está interligada, em média, com 14 células vizinhas (Fig., 55d). Evidenciadas com base no número de vizinhos mais próximos (Fig. 55d).

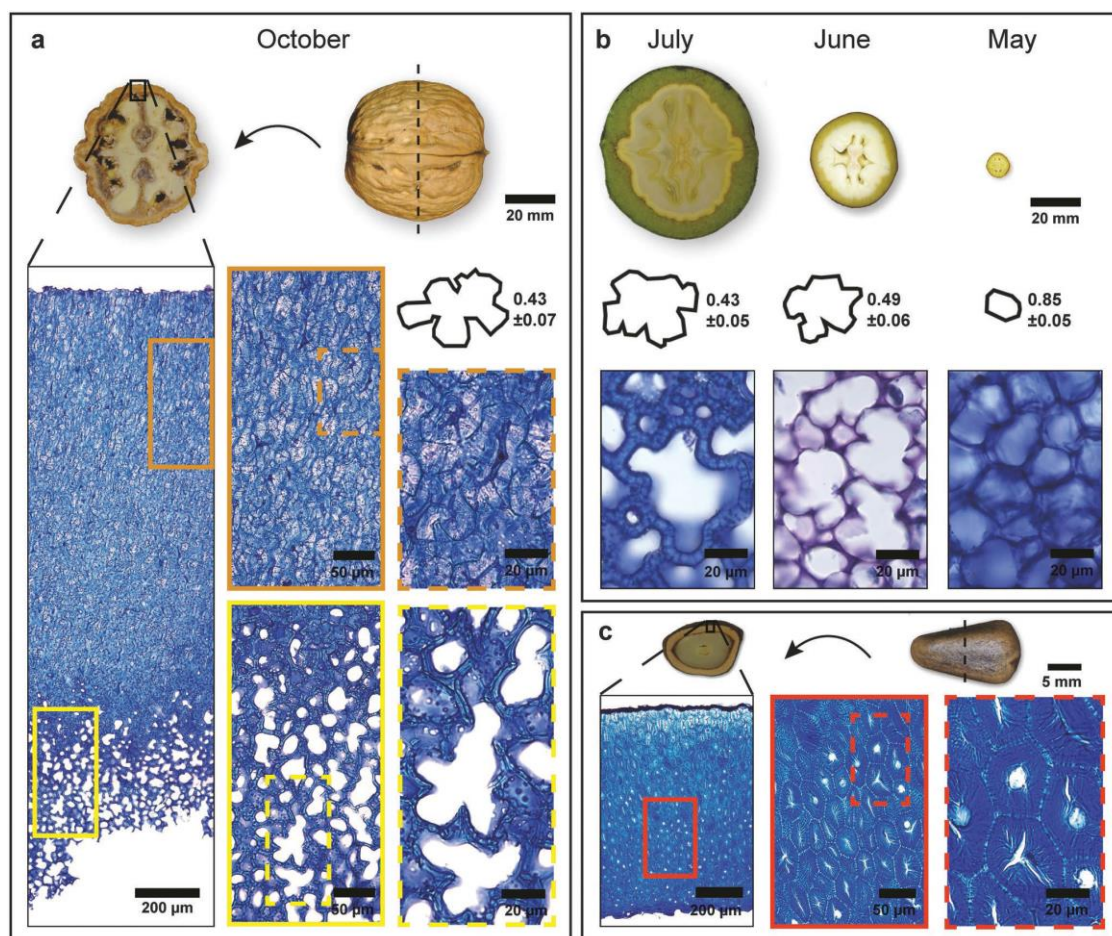
Figura 55 – Visualização 3D de células por CLSM e nano-CT



Fonte: Antreich et al. (2019)

Antreich et al. (2019) revelaram um tipo de célula presente nas cascas das nozes. O resultado é um arranjo intrincado (fig. 56) que não pode ser desmontado quando concebido em que os autores denominam como um quebra-cabeça 3D. Foram feitos testes mecânicos e maior resistência da noz comparada com “sclerenchyma tissue” às sementes de pinheiro, essa maior resistência da casca de noz, deve-se as células intertravadas com “lobed cell structure”.

Figura 56 – Estrutura do tecido de casca de noz e revestimento de semente de pinheiro



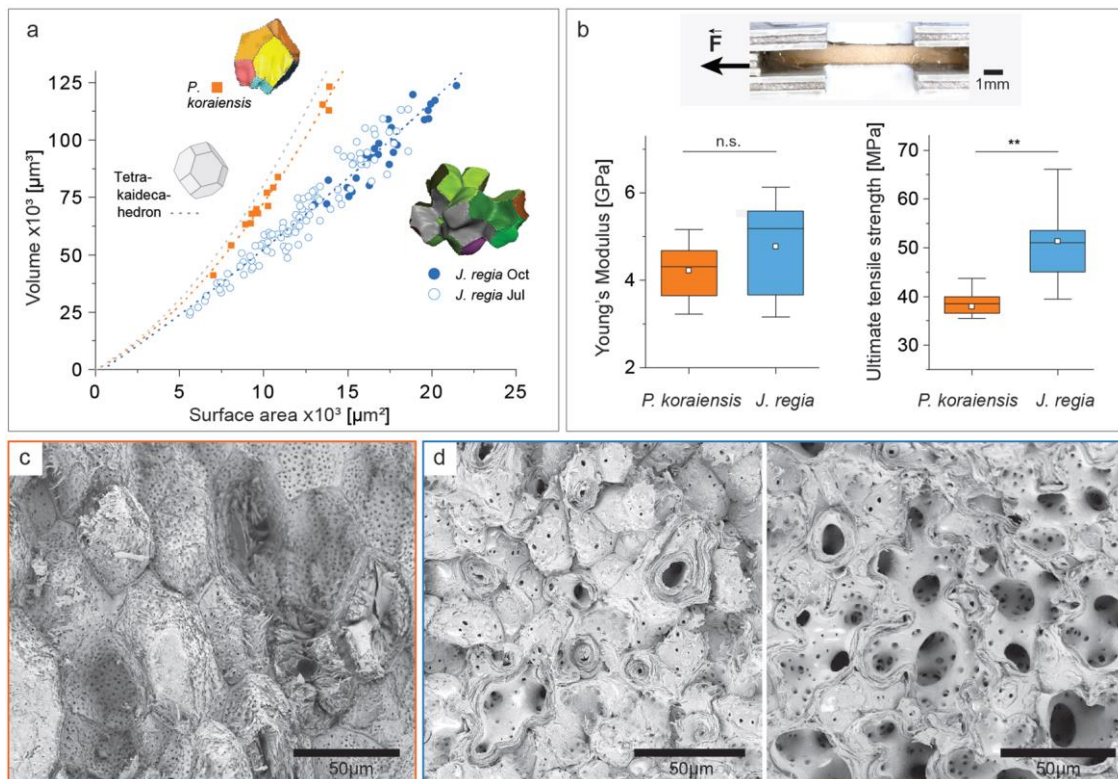
Fonte: Antreich et al. (2019)

Compreendendo uma identidade de estrutura em que seu desenvolvimento irá inspirar nos conceitos de materiais biomimético e de produtos bioinspirados, além de uma valorização dos resíduos alimentares, visto que são altamente difundidas pelo mundo todo. a) Seis fatias exemplares da varredura CLSM (100 fatias, ver também Filme S1 na Informação de Apoio) de duas células únicas, coradas com Calcofluor Branco. As duas células mostram uma diferença na espessura da parede celular (melhor visto em 2 e 3). Os ícones no canto inferior direito mostram a posição da fatia na pilha. Reconstrução 3D da mesma varredura CLSM, revelando a forma lobada das células individuais e o elevado número de poros, que são maiores na parede fina (célula superior direita) em comparação com a célula de parede mais grossa (inferior esquerda). b) Orientação e disposição da peça da casca, que consiste em 170 fatias em

direção z; seis fatias são marcadas a verde e mostradas à direita (1-6). As áreas coloridas indicam as células individuais utilizadas para segmentação e reconstrução digital. c) Reconstrução 3D das células segmentadas, mostrando o encravamento entre células vizinhas (ver também Filme S2 na Informação de Apoio). d) A distribuição das células vizinhas após análise das áreas de contacto entre as células isoladas após reconstrução 3D (ANTREICH et al., 2019).

Na fig. 57 mostra (a) A noz madura, colhida em outubro, mostra uma casca castanha e totalmente desenvolvida. A microsecção azul toluidina revela uma camada exterior densa e uma camada interior com células de paredes finas, exibindo a forma celular polilobada. b) As fases de desenvolvimento de uma noz com forte aumento do fruto de maio a julho. A forma de polilobato em junho e julho com elevada circularidade deriva de uma forma celular regular e disposição celular em maio. c) Em comparação, a estrutura densa do tecido de uma camada de semente de pinho madura com células não lobatadas.

Figura 57 – Comparação da forma celular e mecânica de cascas de nozes e tegumentos de sementes de pinheiro

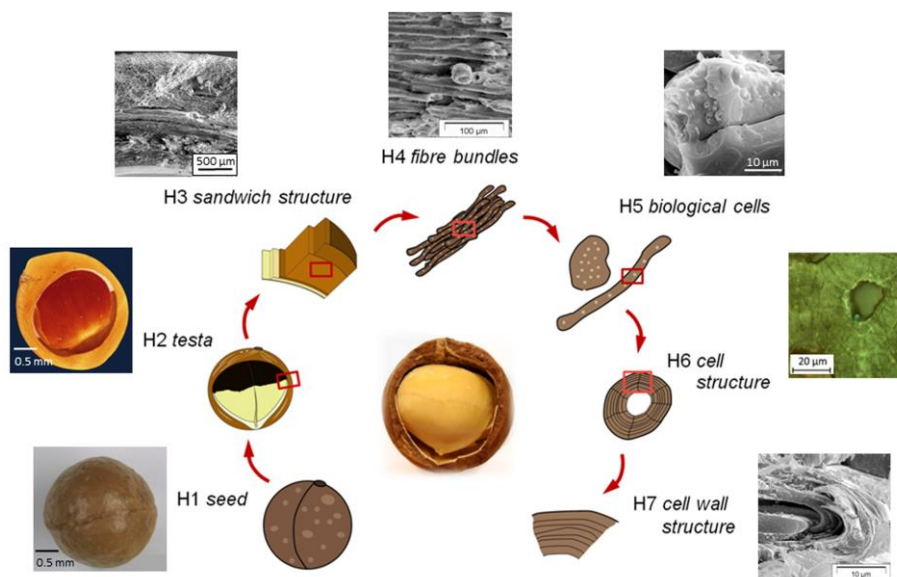


Fonte: Antreich et al. (2019)

2.5.4.11 Macadâmia – *Macadamia integrifolia*

Bührig-Polaczek et al. (2016) apresentam diversos estudos com o Pomelo – *Citrus maxima* a Macadâmia – *Macadamia integrifolia*, para desenvolvimento de estruturas bioinspiradas para absorção de energia. As sementes de macadâmia são conhecidas por serem extremamente difíceis de quebrar. Ao relacionar as forças de fratura que são necessárias para quebrar as cascas de diferentes sementes, das nozes sob compressão, fig. 58, uniaxial à sua espessura, as cascas de macadâmia superam todas as outras cascas. Essas estratégias foram abstraídas e transferidas em princípios estruturais correspondentes e, assim, espumas metálicas bioinspiradas hierarquicamente estruturadas foram projetadas.

Figura 58 – Ilustração esquemática da estrutura hierárquica das sementes de macadâmia contendo sete níveis de hierarquia que vão desde a semente inteira até a estrutura das paredes celulares

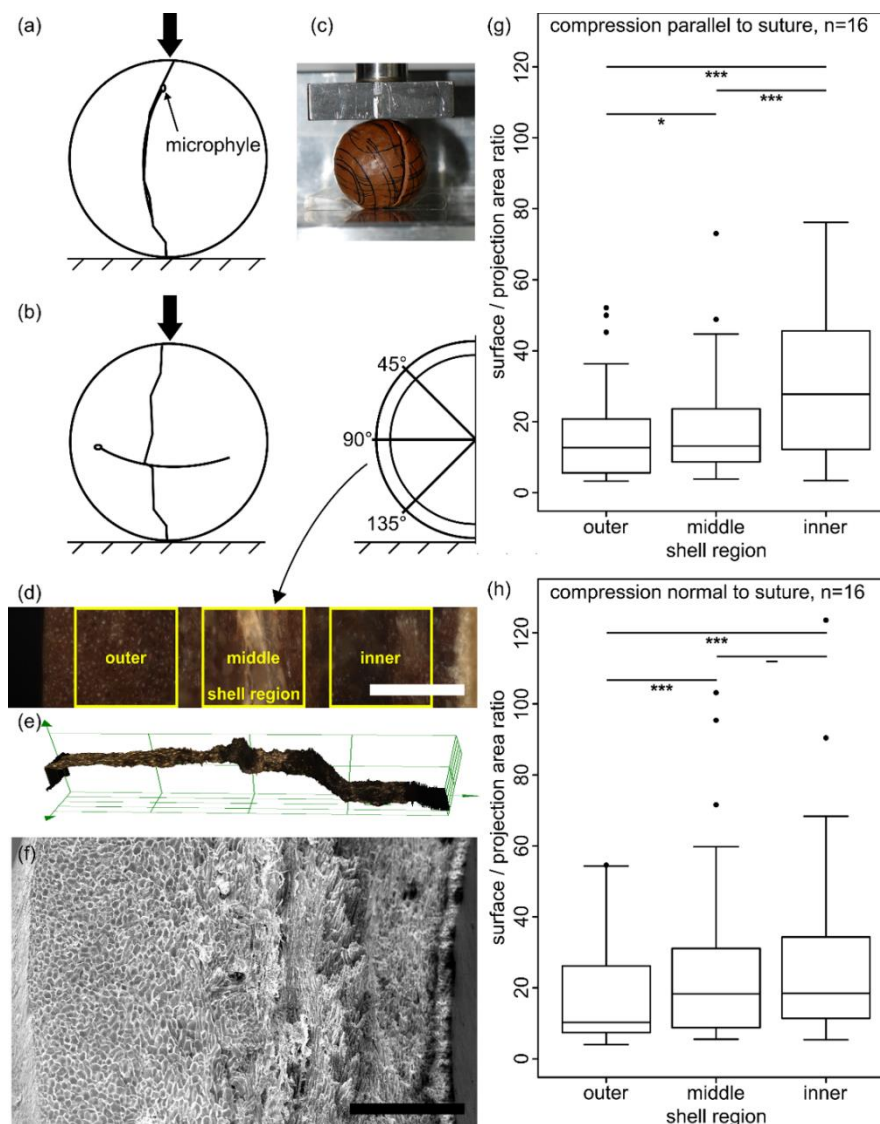


Fonte: Bührig-Polaczek et al. (2016)

A luz (H1, H6) e os micrografos eletrônicos de varrimento (H3, H4, H5, H7), e a secção virtual através de uma reconstrução de volume de microtomografia 3D (H2), disposta ao lado dos esquemas, mostram exemplos típicos de características estruturais dos níveis hierárquicos correspondentes

A estrutura da concha da Macadâmia é altamente anisotrópica em diferentes níveis de hierarquia. A concha é uma estrutura em sanduíche feita de camadas com células de formas diferentes

Figura 59 – Estudos realizados com a macadâmia

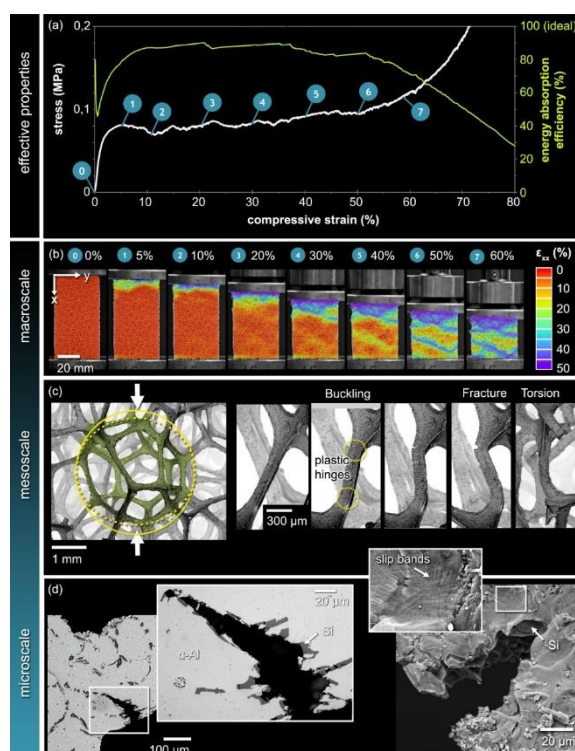


Fonte: Bührig-Polaczek et al. (2016)

Carga da concha quase estaticamente paralela à sutura (a) e normal à sutura (b). A fenda estendeu-se sempre na direção da carga. (c) Imagem de uma concha de Macadâmia sob carga quase-estática revelando uma grande fenda. (d) Micrografia de uma superfície de fratura de Macadâmia com as áreas de projeção a partir das quais a rugosidade foi determinada indicada (barra de

escala = 600 μm). Foram analisadas superfícies de fratura de três posições diferentes, em ângulos de 45°, 90° e 135° em relação à linha de aplicação da força. (e) Topografia da superfície de fratura da concha da Macadâmia mostrada em (d) (exagero vertical) medida usando microscopia de varrimento a laser confocal. (f) Micrografia SEM da superfície da fratura de uma concha de Macadâmia (esquerda = região da concha exterior, direita= região da concha interior, barra de escala = 600 μm). (g) Boxplot mostrando a relação entre a área da superfície e a área projetada para as regiões da concha da Macadâmia ilustrada em (d). A força de compressão que leva à rachadura da concha foi aplicada paralelamente à sutura (ver ilustração em a). (h) Boxplot mostrando a razão entre a área de superfície e a área projetada para as regiões da concha da Macadâmia ilustrada em (d). A força de compressão que leva à fissura da concha foi aplicada normalmente à sutura (ver ilustração em (b)). (- = $p > 0,05$, * = $p \leq 0,05$, ** = $p \leq 0,01$, *** = $p \leq 0,001$).

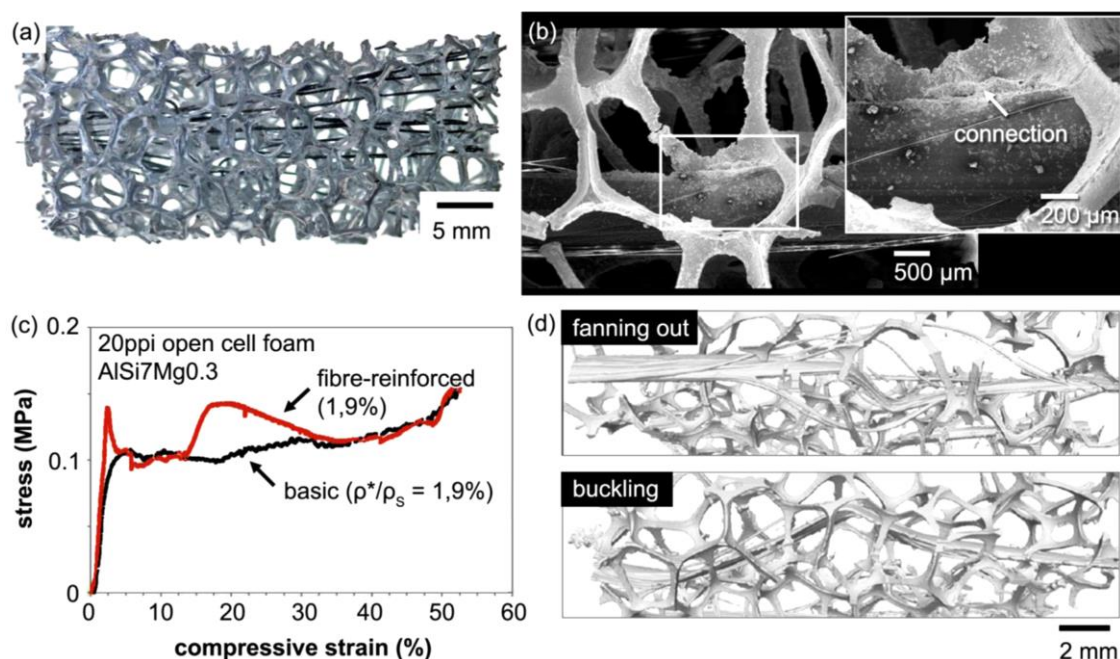
Figura 60 – Representação da relação entre o comportamento mecânico macroscópico de espumas de liga de Al de células abertas e os mecanismos de deformação e falha em diferentes escalas de comprimento



Fonte: Bührig-Polaczek et al. (2016)

Sob compressão, as espumas mostram a típica resposta de tensão-deformação com uma deformação linear-elástica seguida de uma região de platô estendida (painel superior (a)). Os mapas de tensão de superfície correspondentes em fases definidas do teste de compressão, calculados por correlação de imagem digital (DIC) de micrografos leves, são mostrados no painel (b). Os mapas mostram o comportamento de deformação macroscópica e heterogênea de uma amostra representativa de espuma AlSi7Mg0,3 . Na mesoscala, as escoras individuais são carregadas principalmente em flexão ou torção e a falha é caracterizada por encurvadura ou fratura plástica, como mostram os micrografos electrónicos de varrimento no painel (c). Os micrografos electrónicos leves (esquerda) e de varrimento (direita) no painel (d) demonstram o papel das partículas frágeis na microestrutura: provocam a formação de microfissuras e reduzem assim a tenacidade das escoras.

Figura 61 – *Photograph of an Al foam*



Fonte: Bührig-Polaczek et al. (2016)

Na figura 61 (a) representa a fotografia de amostra com feixes ramificados de fibras de Al_2O_3 ; (b) são micrografias electrónicas de varrimento de uma amostra de espuma Al-alloy reforçada com fibras mostrando a ligação entre o feixe de fibras e a matriz de espuma (quadrado branco e inserção ampliada); (c)

são curvas de tensão-deformação representativas de uma amostra de espuma convencional e reforçada com fibras sob compressão uniaxial; (d) são reconstruções microtomográficas de volume mostrando os dois mecanismos típicos de falha sob compressão: fanning out (parte superior) e flecha (parte inferior) dos feixes de fibras dentro da matriz de espuma.

De acordo com os autores os materiais técnicos com níveis hierárquicos têm uma grande chance para aplicações diversas em várias áreas do conhecimento e preencherão com o tempo algumas lacunas nos mapas atuais de propriedades de novos materiais. Os resultados das investigações apresentadas, acima, demonstraram que há possibilidades de alcançar propriedades materiais importantes ou novas funções por meio do conhecimento da estruturação hierárquica presente nas frutas, cascas e sementes para desenvolvimento de novos produtos e materiais.

Como resultado foi estabelecida com sucesso um caminho para a produção de estruturas bioinspiradas em metal por fundição. Dessa forma, esse estudo comprova a eficiência na produção de estruturas complexas e confiáveis, por meio da implementação, combinação de diferentes elementos estruturais hierárquicos encontrados como geradores do conceito biológico e aplicação para melhoramento de estruturas para melhor eficiência em dissipação de energia e resistência à colisão e impacto, como estudos no Pomelo e Macadâmia, primeiro com sua estrutura esponjosa e segundo da integração das fibras, bem como a abstração dos dois processos encontrados para o desenvolvimento de uma nova estrutura baseada em ambos.

Parte III

3 METODOLOGIA GERAL DA PESQUISA

3.1 Método de abordagem

A presente pesquisa trata-se de uma abordagem que a escolha da pesquisa possa considerar critérios tais como: adequação aos conceitos envolvidos, adequação aos objetivos e pesquisa Marconi e Lakatos (2010). Devido as variáveis experimentais relacionadas aos conceitos abrangentes que integram o processo de desenvolvimento de novos produtos relacionando-o com as tecnologias vigentes, a interpretação dos dados coletados deve ser capaz de representar uma abordagem perceptiva, por isso uma abordagem qualitativa torna-se mais adequada para a pesquisa em questão, pois as pesquisas qualitativas não tem por definição a capacidade de generalização dos dados coletados.

Para Minayo (2009) a pesquisa qualitativa responde a questões muito particulares e realiza-se fundamentalmente por uma linguagem baseada em conceitos, proposições, hipóteses, métodos e técnicas, linguagem esta que se constrói com um ritmo próprio e peculiar.

Ela ocupa, nas Ciências Sociais, com um nível de realidade que não pode ou não deveria ser quantificado. Ou seja, ela trabalha com o universo dos significados, dos motivos, das aspirações, das crenças, dos valores e das atitudes. Esse conjunto de fenômenos humanos é entendido aqui como parte da realidade social, pois o ser humano se distingue não só por agir, mas por pensar sobre o que faz e por interpretar suas ações dentro e a partir da realidade vivida e partilhada com seus semelhantes (MINAYO, 2009, p. 21).

De acordo com Richardson (2008) a pesquisa qualitativa justifica-se por:

Os estudos que empregam uma metodologia qualitativa podem descrever a complexidade de determinado problema, analisar a interação de certas variáveis, compreender e classificar processos dinâmicos vividos por grupos sociais, contribuir no processo de mudança de determinado grupo e possibilitar, em maior nível de profundidade, o entendimento das particularidades do comportamento dos indivíduos (RICHARDSON, 2008, p.79/80).

3.2 Método de procedimento

Quadro 2 – Procedimentos da pesquisa qualitativa.

Procedimentos	Características
(1) fase exploratória: levantamento de Estado da Arte, consulta a especialistas e observação direta.	<i>Consiste na pesquisa empírica cujo objetivo é a formulação de questões para aumentar a familiaridade do pesquisador com o ambiente. Uma variedade de coletas de dados pode ser usada e procedimentos exploratórios para escolha do espaço. Obtêm-se descrições tanto quantitativas quanto qualitativas.</i>
(2) trabalho de campo: coleta dos frutos para análise exploratória e condução da pesquisa	<i>Consiste em levar para a prática empírica a construção teoria elaborada na primeira etapa. Essa fase combina instrumentos de observação extensiva como: questionários para interlocução com os pesquisados, levantamento de material documental e outros. Nessa fase que se faz confirmação e refutação de hipóteses e de construção de teoria.</i>
(3) análise e tratamento do material empírico documental: analisar as imagens obtidas através de estudo microscópico para reflexão, abstração e transferência de estratégia para o artefato bioinspirado.	<i>Diz respeito ao conjunto de três procedimentos para: compreender, interpretar os dados empíricos, articulá-los com a teoria que fundamentou o projeto ou com outras leituras teóricas e interpretativas cuja necessidade foi dada pelo trabalho de campo.</i> <i>(a) ordenação dos dados</i> <i>(b) classificação dos dados</i> <i>(c) análise propriamente dita.</i>

Fonte: Adaptado de Minayo (2009)

3.3 Técnicas de pesquisa

3.3.1 Fase Exploratória

Para Marconi e Lakatos (2006, p. 176) “Técnica é um conjunto de preceitos ou processos de que se serve uma ciência ou arte; é a habilidade para usar esses preceitos ou normas, a parte prática”. A pesquisa contou com três técnicas de pesquisa para levantamentos de dados de acordo com Marconi (2009) que foram divididas em 3 fases.

- **Primeira fase da pesquisa**

Caracteriza-se pela Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) através dos métodos Conforto et al. (2011), para a fundamentação teórica da pesquisa em questão que segundo Marconi (2009 *apud* MANZO 1971, p. 57) “oferece meios para definir, resolver, não somente problemas já conhecidos, como também explorar novas áreas onde os problemas não se cristalizaram suficientemente”.

- **Segunda fase da pesquisa**

Pesquisa documental (ou de fonte primárias) de caráter indireto: Tem como característica a coleta de dados restrita a documentos, escritos ou não, constituindo o que se denomina de fontes primárias em que são levantados dados de variadas fontes, quaisquer que sejam os métodos ou técnicas empregadas e esse material serve de orientação para outras fontes de coleta (MARCONI, 2009).

- **Terceira fase da pesquisa**

Observação direta extensiva: realiza-se por meio Pesquisa-ação, (FRANCO, 2005).

3.4 Etapas metodológicas/atividade/método e ferramentas

No quadro 3, foram desenvolvidas 4 fases com suas respectivas etapas metodológicas abordando as principais atividades, seus referenciais teóricos, assim como métodos e ferramentas necessárias para o desenvolvimento empírico da pesquisa nos âmbitos de cada objetivo específicos a ser cumprido.

As fases desta pesquisa são identificadas de forma diluída nas etapas dos diagramas que constituem o *Biomimicry DesignLens*. Trata-se de uma abordagem metodológica desenvolvida pelo *Biomimicry Institute* 3.8, que inclui o *Biomimicry Design Thinking*, e tem seu detalhamento enquadrado nas etapas e fases constituintes na modalidade do diagrama Biologia para Design, sendo uma metodologia flexível para processos criativos com aplicação de modelos da natureza na criação de soluções bioinspiradas inovadoras.

O diálogo em todas as etapas ocorre de forma contígua durante o desenvolvimento desta tese. A modalidade Biologia para Design foi selecionada por apresentar um método didático que tem uma aproximação com o tipo de abordagem de projeto *bottom-up*, facilitando o cumprimento dos objetivos frente à problemática apresentada.

O *Biomimicry Thinking* é constituído por quatro áreas em que se desenvolve o processo: 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 de forma bem-sucedida às estratégias e princípios da vida na área de projetos bioinspirados.

O diagrama é composto por quatro campos principais, conforme a fig. 62.

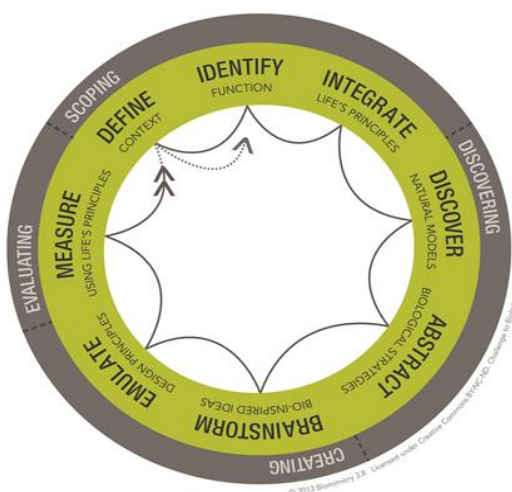
1. Escopo: Divido em três etapas; onde se define o contexto do problema, identificação das funções necessárias ao projeto e integração dos princípios da vida; é um exercício de briefing envolvendo a identificação preliminar do problema e o contexto antes do design de uma solução.

2. Descobrindo: Dividido em duas etapas; descobrindo um modelo natural e abstração das estratégias biológicas; se trata de um o processo de pesquisa exploratória em busca de inspiração para o design.

3. Criando: Subdivido em duas etapas; brainstorm para ideias bioinspiradas e emular os princípios de design; um exercício na busca de soluções de design criativo para um desafio específico.

4. Avaliando: Onde se avalia o projeto usando como medida, os princípios da vida. O processo atinge melhores resultados quando ocorre em processos iterativos. Este é o caminho para medir ou estimar a natureza, qualidade, capacidade, extensão ou importância de uma solução específica.

Figura 62 – Diagrama Biomimicry Thinking - Challenge to Biology - Biomimicry DesignLens



Fonte: Biomimicry Institute 3.8 (2015)

A abordagem não é rígida e pode-se percorrer o diagrama de forma sequenciada (*Challenge to Biology* - Desafio de biologia) ou aleatória (*Biology to Design* - Biologia para Design). Ambos os casos apresentam caráter cíclico de abordagem, e considera-se que os melhores resultados surgem com o uso do diagrama múltiplas vezes em um processo iterativo, resultando em aprimoramento do projeto (BIOMIMICRY INSTITUTE 3.8, 2015).

Quadro 3 – Fases metodológicas: relação dos objetivos/ etapas/ atividade/ método e ferramentas

FASE 1 – Escopo

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ETAPAS OU ESTRATÉGIAS METODOLÓGICAS	ATIVIDADE	MÉTODO/ MODELO/ TÉCNICA OU FERRAMENTA
1. Fazer levantamento do Estado da arte sobre as frutas com características naturais para dissipação de energia e choques mecânicos;	Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS);	Levantamento de Estado da Arte sobre estudos envolvendo frutas para desenvolvimento de estruturas bioinspiradas para absorção de energia, absorção de impacto, choque e colisão;	Pesquisa bibliográfica documental e técnica; Revisão Sistemática de literatura, baseada na metodologia de Conforto et al. (2011);
2. Pesquisa exploratória (seleção das frutas, com recorte geográfico e com características intrínsecas ao objeto de estudo;	Consulta a especialista, postulados da literatura, reflexões do pesquisador e autorreflexão coletiva (TRIPP, 2005);	Pesquisa de caráter exploratório, no qual o pesquisador tem envolvimento direto com o objeto de pesquisa. Nessa fase, implicou nos aspirais de ação, reflexão, planejamento e seleção das frutas;	Pesquisa Ação (FRANCO, 2005), colaborativa: quando a transformação ocorre através de um grupo de colaboradores engajados com a ação, onde o pesquisador faz parte e participa do processo;
3. Identificar características morfológicas e anatomia;	Tipos, características, origem, morfologia;	Produção de Lâminas, descrição da anatomia dos frutos; LAVeg (Laboratório de Anatomia Vegetal na UFPE)	Estudo da forma, da configuração, da morfologia do fruto. (Epicarpo, Mesocarpo e Endocarpo); (RUZIN, 1999).
FASE 2 – Descobrindo			
Cont. quadro 3			
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ETAPAS OU ESTRATÉGIAS METODOLÓGICAS	ATIVIDADE	MÉTODO/ MODELO/ TÉCNICA OU FERRAMENTA
4. Observar as estruturas por meio de imagens de microscopia eletrônica de varredura;	Atividades de campo – coleta de amostras para realização das análises, assim como, atividade de campo para coleta e preparação da matéria-prima que	Imagens MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura.	Análises das amostras de estudo para levantamento qualitativo das propriedades do objeto de estudo, com atividades laboratoriais dentro dos rigores científicos necessários

	será utilizada na pesquisa;		para a execução coleta, fixação, conservação, preparação histológica (seccionamento, alvejamento/clarificação, dissociação/maceração, diafanização, coloração e montagem) (DEDAVID. 2007).
5. Desenvolver uma categorização hierárquica;	Estudo da morfologia e anatomia vegetal	Através das análises MET, estudo do tipo de hierarquização estrutural;	Estudo das estruturas hierárquicas (treliças, sanduíches, esponjas) para identificar as células de amortecimento e dissipação de energia)
FASE 3 – Criando			
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ETAPAS OU ESTRATÉGIAS METODOLÓGICAS	ATIVIDADE	MÉTODO/ MODELO/ TÉCNICA OU FERRAMENTA
6. Desenvolver um modelo digital tridimensional bioinspirado;	Configurações e parâmetros geométricos inspirados hierárquicos. Microtomografia computadorizada e reconstrução CT;	Escaneamento por Raio-X. Fruto inteiro e pedaços; Reconstrução 3D;	Habilitação de um computador apropriado (workstation) para desenvolvimento da modelagem e uso de software de reconstrução VGStudio MAX;
FASE4 – Avaliando			
7. Desenvolver um protótipo da estrutura bioinspirada;	Prototipação 3D	Uso do software 3D, modelagem de uma estrutura bioinspirada;	Fabricação digital e tipos de impressora 3D e Manufatura Aditiva ou Resina flexível;
8. Definir um framework para desenvolvimento de produtos bioinspirados;	Processos de design	Desenvolver um infográfico com as etapas do processo	Produção de infográficos,

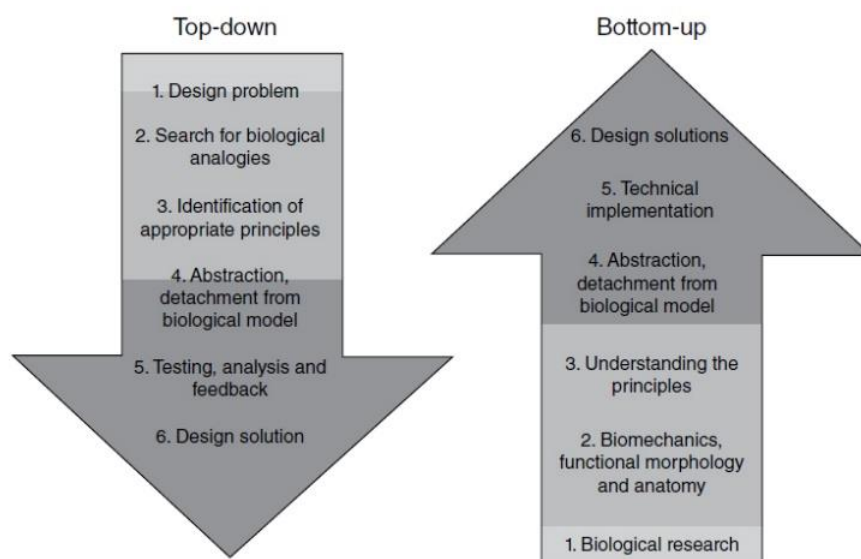
Cont. quadro 3

9. Desenvolvimento de workshop para aplicação de conceitos de design e bioinspiração	3 encontros com alunos de graduação para desenvolvimento de produtos bioinspirado e aplicação da estrutura bioinspirada.	Atividades em grupo com alunos da graduação da UFPB.	Apresentação de pranchas gráficas contendo soluções, como sketches, desenhos projetivos e renderização 3D.
10. Desenvolver conceitos de produtos	Resultados do workshop com a estrutura bioinspirada.	Atividade em grupo com alunos da graduação de Design UFPB	Conceitos de produtos e apresentação em 3D.

Fonte: autor

A realização das etapas a serem seguidas não são rígidas. O *Biomimicry Institute* elenca duas possibilidades que podem ocorrer de acordo com a fig. 19 e possibilita percorrer o diagrama de forma sequenciada (baseado no problema (Top-down) - etapas podem seguir sequencialmente que se inicia com um problema de design (uma problemática) até a resolução do problema baseado na solução biológica transferida da natureza ou por meio do (baseado em soluções (Bottom-up) – processo definido de acordo com a necessidade) em que se estuda um ente biológico, mapear suas estratégias, através da compreensão dos seus princípios biológicos, faz a sua abstração, utiliza-se uma técnica de implementação para se propor uma solução de design.

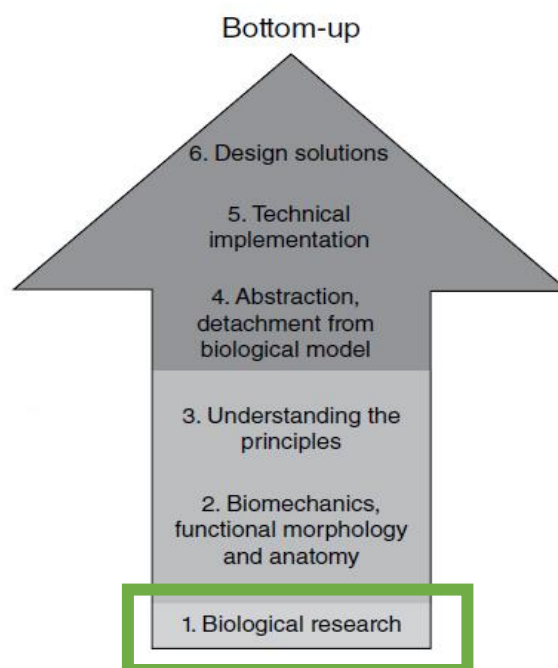
Figura 63 – *Biomimetics approaches*



Fonte: *Biomimicry Institute*

3.5 FASE 1 – Escopo

Figura 64 – Pesquisa biológica



Fonte: Adaptado Biomimicry 3.8

3.5.1 Revisão Bibliográfica Sistemática

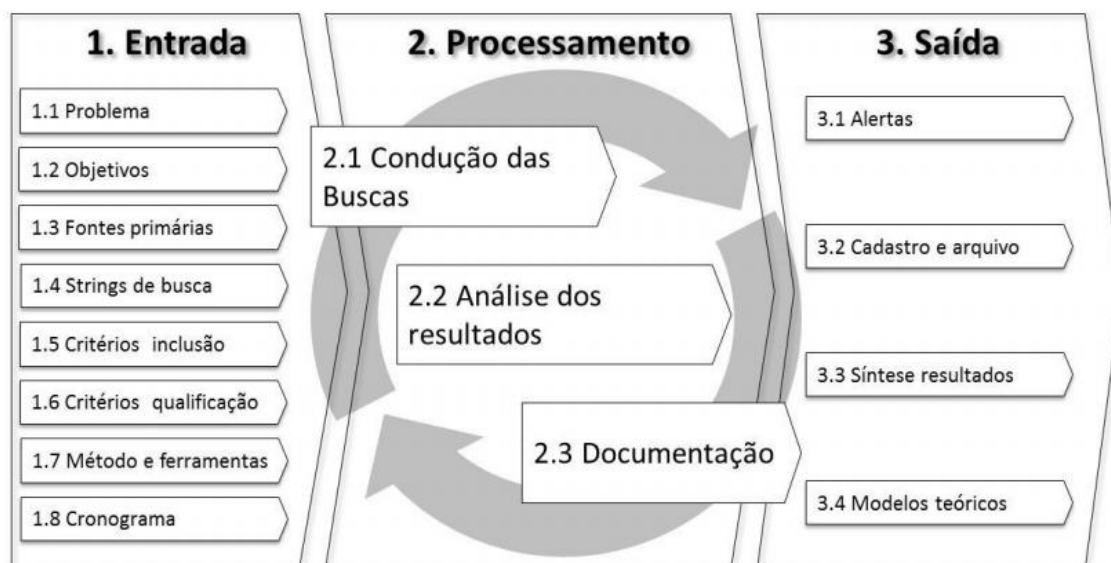
Utilizou-se uma RBS (Revisão Bibliográfica Sistemática) realizada conforme modelo simplificado proposto por Conforto et al. (2011) para fundamentação teórica. Através desta revisão foi possível fazer um mapeamento e processar dados, sintetizando-os para formulação do referencial teórico da tese. Dessa forma, avaliou-se um conjunto de artigos científicos com a intenção de identificar o **Estado da Arte** sobre os respectivos campos teóricos nos últimos anos para o desenvolvimento da base científica e elencar os principais autores citados nesses estudos coletados para fundamentar a construção teórica.

De acordo com Conforto (et al. 2011 apud LEVY; ELLIS, 2006) uma Revisão Bibliográfica Sistemática é útil para:

- Ajudar o pesquisador no dimensionamento e compreensão do corpo de conhecimento referente a um determinado assunto, incluindo identificar pesquisas que já foram realizadas, o que falta pesquisar, quais são as lacunas;
- Prover um embasamento teórico sólido para o estudo proposto, como complemento ao item anterior;
- Prover evidência e o devido embasamento para o problema de pesquisa que guiará a investigação;
- Apresentar as devidas justificativas para a condução o estudo, e qual a contribuição original para o corpo de conhecimento e/ou teoria;

Contribuir para melhor definir e estruturar o método de pesquisa, objetivos e questões para o estudo proposto. Segundo Conforto et al. (2011) as etapas da RBS podem ser descritas em 15 etapas e divididas em 3 fases: **Entrada, Processamento e Saída**. Abaixo segue tabela com as respectivas fases e descrição de cada uma das etapas da RBS desenvolvida nessa dissertação.

Figura 65 – Modelo para condução da Revisão Bibliográfica Sistemática



Fonte: Conforto et al. (2011)

Quadro 4 – Modelo para condução da Revisão Bibliográfica Sistemática.

Entrada	Caracterização
Problema de pesquisa: etapa em que se busca formular e responder uma ou mais perguntas para serem respondidas através da RBS;	1- Quais principais assuntos abordados nos últimos 5 anos sobre materiais bioinspirados a partir de frutas? 2- Quais principais autores citados nessas publicações? 3 – Quais as estruturas hierárquicas das respectivas frutas, cascas ou sementes para desenvolvimento de produtos bioinspirados?
Objetivos: são a base para a análise dos artigos encontrados e as fontes primárias que auxiliam a definir as palavras-chave;	O objetivo dessa RBS é mapear os trabalhos científicos publicados nos últimos anos sobre desenvolvimento de estruturas bioinspiradas para desenvolvimento de produtos e para a fundamentação teórica. Assim como identificar palavras-chaves, principais autores e identificar “Gaps” na literatura sobre o assunto estudado.
Fontes primárias: constituem-se de artigos, periódicos, junto com as bases de dados que ajudarão a identificar principais autores e a relevância dos artigos.	Periódicos capes – através do acesso CAFe – comunidade acadêmica federada, o qual permite o acesso remoto ao conteúdo assinado do Portal de Periódicos disponível pela UFPE.

Strings: é a identificação das palavras e termos para busca e definição dos critérios de inclusão, qualificação, métodos, ferramentas e cronograma; usados para buscas em sites de base e pesquisa, em que se usam operadores booleanos (AND, OR), aspas duplas, como filtros de pesquisa.	Através do método PIPOC foi obtido as “strings” com os operadores booleanos para filtragem final.
Critérios de inclusão: nessa etapa leva em consideração os objetivos da pesquisa e são definidos critérios de Inclusão e Exclusão do material coletado.	Formam criados critérios de Inclusão e exclusão que são respectivamente: Filtro 1 (Título, resumo e palavras-chaves) Filtro 2 (Introdução e Conclusão) Filtro 3 (Leitura completa) Não atentem os objetivos da pesquisa Não estudos primários Não são frutas Exclusão através do Título ou Palavras-chaves.
Critérios de qualificação: nessa etapa identifica-se a importância do artigo com base em alguns critérios de avaliação, tais como: observar seus métodos de pesquisa e citações obtidas; Títulos; Abstract e conclusão.	Os critérios de qualificação dos artigos foram feitos de acordo com os critérios de inclusão e intensificaram-se a partir do Filtro 2 com a leitura da Introdução e Conclusão da pesquisa, já avaliando métodos das pesquisas e objetos de estudos.
Método e Ferramentas: métodos de busca e as ferramentas como: filtros, formas de pesquisas e	Método – PICOC – Population; Intervention; Comparison; Outcome and Context. O qual é disponibilizado através do portal http://parsif.al que serviu de armazenamento e gerenciador para essa RBS.

como serão armazenados.	Seguem respectivamente à baixo as definições para o método PICOC: A população na qual as evidências são coletadas, A intervenção aplicada no estudo empírico, ou seja, qual tecnologia. A comparação com a qual a intervenção é comparada. Os resultados do experimento não devem ser apenas estatisticamente significativos, mas também significativos do ponto de vista prático. O contexto do estudo deve ser definido, que é uma visão ampliada da população, incluindo se ela é realizada na academia ou na indústria, em que segmento da indústria, e também os incentivos para os sujeitos. P- “fruits”; I- “Biomimetics”; C- “design”; O- “bioinspiration”; C- “technology”.
Cronograma: estimativa de prazo, do planejamento até a sua conclusão.	A pesquisa teve um espaço reservado de 3 meses
Figura 66 – Método da revisão bibliográfica de literatura Fonte: Conforto et al. (2011)	
Processamento:	Caracterização
Condução da busca: é definição da busca a ser realizada como buscas cruzadas e lista de base de dados.	Base de dados: Periódicos CAPES - http://www.periodicos.capes.gov.br/

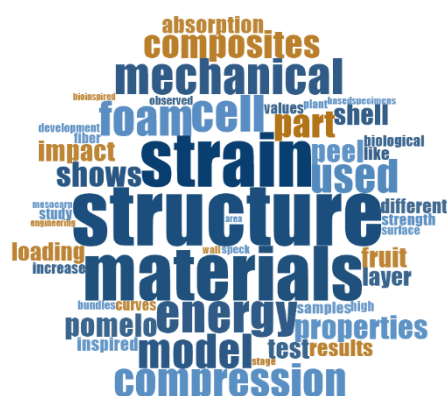
	ISI Web of Science - http://www.isiknowledge.com Science@Direct - http://www.sciencedirect.com Scopus - http://www.scopus.com
Análise dos resultados: <i>é realizada a leitura e análise dos resultados, ou seja, os filtros de leitura.</i>	Após os filtros de leitura presentes nas etapas 2, 3 e 4 os arquivos foram armazenados no parsifal e catalogados, informando a quantidade de artigos encontrados, excluídos e na busca cruzada.
Documentação: <i>as informações documentadas são: quantidade de artigos encontrados por periódico, base de dados, quantidade de artigos excluídos, quantidade de artigos encontrados na busca cruzada.</i>	As informações foram documentadas em uma plataforma chamada Parsifal é uma ferramenta online projetada para apoiar pesquisadores a realizar revisões sistemáticas de literatura. Em cada seção de base de dados há imagens da quantidade de resultados e posteriormente a quantidade após busca cruzada. Em que também foi retirado o Método – PICOC .

Fonte: autor

3.5.2 Resultados da RBS

Abaixo segue a descrição de cada uma das etapas da RBS e seus respectivos resultados apresentados em uma tabela geral e em gráficos do tipo *word clouds* com auxílio do software Nvivo 12.

Figura 67 – Nuvem de palavras, Nvivo 12



Fonte: autor

Quadro 5 – SLR search: search string delivery results classified by database

Database	Search string	Total	Rejected	Duplicated	Results
Scopus	ALL ("fruit" OR "fruit walls" OR "fruit peels" OR "seed shells" OR "fruit*") AND ALL ("bionic" OR "bio-inspired" OR "biomimicry" OR "biomimetic*" OR "bio-inspired" OR "bioinspiration") AND ALL ("foams" OR "lattices" OR "sandwich panels" OR "honeycomb" OR "Cellular material" OR "bio-inspired structures" OR "Structural hierarchy") AND ALL ("impact resistance" OR "energy absorption" OR "energy absorber" OR "crashworthiness" OR "shock dissipation"))	75	41	13	20
Science Direct		8	4	3	1
Web of Science		4	0	3	1
Add studies (no SLR)		1	0	0	4
Total results		91	45	23	22

Fonte: autor

Quadro 6 – Escopo da pesquisa: obtido através da aplicação do framework PICOC

Concept	Definition	SLR application
Population	The problem or situation the research is dealing with.	Fruits, fruit walls, fruit peels and seed shells for development and applications research: Biomimetics for energy absorber.
Intervention	Existing techniques utilised to address the problem identified.	Methods, tools and techniques for new technologies: Additive Technology Platforms.
Comparison	Techniques to contrast the intervention against.	Contrast between intervention techniques.
Outcome(s)	The measure to assess the effect of the techniques in the population.	Bio-inspired, Structural hierarchy.

Context	The particular settings or areas of the population.	Product Design.
---------	---	-----------------

Fonte: autor

Quadro 7 – Resultados da RBL

Fruits <i>Natural Packaging</i>	Bio-inspired <i>Structures</i>	Result highlight <i>Energy absorption enhancement mechanisms</i>	Authors <i>References</i>
1. Pomelo (<i>Citrus maxima</i>)	• Foamy structure • Hierarchical structure	• Foamy structure Gradient foam • Hierarchical structure	[1] Fischer et al. (2010) [2] Seidel et al. (2010) [3] Fischer et al. (2013) [4] Thielen et al. (2013) [5] Looyrach et al. (2015) [6] Ortiz et al. (2018) [7] Wang et al. (2018) [8] Wang et al. (2019) [9] Li et al. (2019) [10] Wen et al. (2019) [11] Schäfer et al. (2020)
2. Coconut (<i>Cocos nucifera</i>)	• Macroscopically ordered • Microscopically disordered	• Natural fiber orientation inspired artificial energy-absorption components of composite materials	[12] Lu et al. (2019)
3. Cocoyol (<i>Acrocomia Mexicana</i>)	• Hierarchical cellular structure	• High toughness and • high hardness • Mechanical performance	[13] Flores-Johnson et al. (2014) [14] Flores-Johnson et al. (2018)

Cont. quadro 6

4. Nuts and Seeds 4.1 Walnut (<i>J. regia</i>) 4.2 Pecan (<i>Illinoensis</i>) 4.3 Pistachio (<i>P. Fandoghi</i>) 4.4 Beechnut (<i>sylvatica</i>) 5. Macadamia (<i>M. ternifolia</i>) 6. Brazil nut (<i>Bertholletia excelsa</i>)	• Polygonal form • Sandwich layers • Hierarchical technical materials	• A hard core • Soft outer layer with high impact strength • Some fibers oriented radially to the core • Various kinds of fibrous • Lobed cell structure • Interlocked walnut cell	[15] Kaupp et al. (2011) [16] Antreich et al. (2019) [17] Bührig-Polaczek et al. (2016) [18] Sonogo et al. (2016)
7. Durian (<i>Durio zibethinus</i>)	• Thorns structure • Spherical shape	• Total energy absorbed in the axial direction • absorption capacity of the thorns increased with the increase in the number of thorns	[19] San Ha et al. (2019)
8. Formosan gum (<i>Liquidambar formosana</i>)	• Hierarchical structures • Spherical Fibonacci model	• Designs of novel lightweight, anti-buckling composites, and bio-inspired architectures • micro-scale and the chambers distributed at the macro-scale	[20] Tung et al. (2020)
9. luffa sponge (<i>Luffa aegyptiaca</i>)	• Hierarchical structures	• Natural cellular material • Mechanical properties	[21] Xie et al. (2020)
10. Babassu nut (<i>Orbignya speciosa</i>)	• Fibre composites • Biomimetic composite structure	• High requirements regarding hardness and impact	[22] Staufenberg et al. (2015)

Fonte: autor

3.5.3 Pesquisa Ação

A Pesquisa ação parte da lógica de análise usual indutiva que buscar um resultado a partir do particular para generalização. A lógica indutiva parte do estudo fenomenológico, através dos efeitos ou resultados de um dado fenômeno. Dessa forma, o pesquisador procura descobrir, pelo meio da observação do comportamento dessas variáveis, como respostas que permitem compreender os conceitos, práticas e diretrizes que explicam o resultado observado (SANTOS, 2018 apud DORT, 2011).

A pesquisa ação é um método de pesquisa de caráter exploratório, no qual o pesquisador/observador tem envolvimento direto com o objeto de pesquisa. A pesquisa ação pode ser classificada, segundo Franco (2005) em: colaborativa, crítica e estratégica.

Esta pesquisa utilizou o modo colaborativo em que o pesquisador faz parte do grupo e está engajado com a ação e participa do processo cujo objetivo é mapear frutas que possuem características em comum com aspectos de absorção de energia. O método permitiu mapear e identificar as frutas e buscar informações com especialistas como Prof.^a Dr. Emília Arruda.

Abaixo são apresentadas as etapas da pesquisa-ação e suas respectivas descrições para a seleção das frutas para pesquisa:

Quadro 8 – Etapas, descrição e objetivo da pesquisa-ação

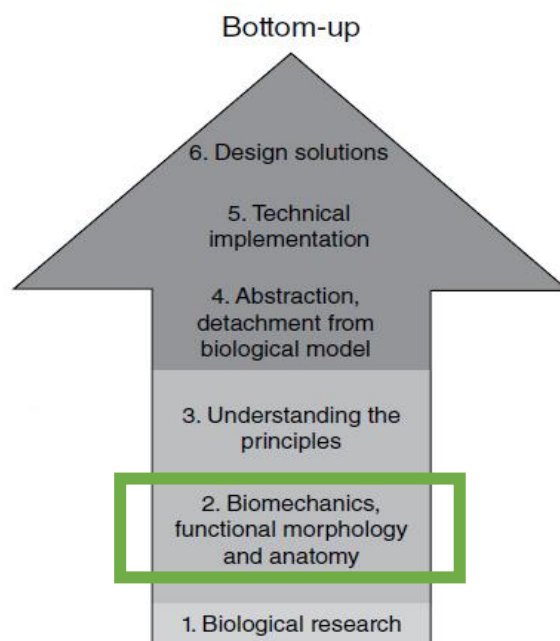
ETAPAS	DESCRIÇÃO	OBJETIVO
1. 1. Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS)	Revisão dos principais constructos e ampliação da compreensão dos pressupostos para adequação do método pesquisa-ação.	Fazer levantamento do Estado da arte sobre as frutas com características naturais para dissipação e absorção de energia a choques mecânicos;

Cont. Quadro 8		
2. Fase Exploratória	Objetivou determinar o campo de investigação, as expectativas, bem como o tipo de auxílio que o grupo formado por especialistas poderão oferecer ao longo do processo da pesquisa;	Pesquisa de caráter exploratório, no qual o pesquisador tem envolvimento direto com o objeto de pesquisa.
3. Definição do problema	Exposição clara do problema, bem como seus pressupostos/premissas;	Definir com precisão de ordem prática a problemática a ser desenvolvida;
4. Planejamento colaborativo	Reunião com os membros da equipe e pesquisadores interessados para definição de critérios de seleção. A partir dessa fase houve a seleção dos frutos com as características a serem observadas;	Escolhas dos frutos para observação em microscopia óptica;
5. Protocolo de coleta de dados	Protocolo das ferramentas de coleta de dados e critérios de aplicação	Foram colhidas amostras dos frutos selecionados no Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco - CEASA/PE
6. Coleta de dados	Pesquisa de campo para observação direta das estruturas dos frutos;	Observação direta em microscopia óptica feita no Laboratório de Anatomia Vegetal (LAVeg, UFPE).
7. Reflexão/ resultados	A aprendizagem durante o processo de investigação para categorização, codificação e tabulação dos dados obtidos na pesquisa-ação;	Aprendizagem, discussão e resultados para norteameto da pesquisa e aferição das conclusões.

Fonte: autor

3.6 FASE 2 – Descobrindo

Figura 67 – análises da anatomia



Fonte: Adaptado Biomimicry 3.8

3.6.1 Laboratório de Anatomia Vegetal (LAVeg - UFPE)

O Laboratório de Anatomia Vegetal da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) é coordenado pela Prof.^a. Dr^a Emília Cristina Pereira Arruda em que supervisionou toda a pesquisa exploratória contida na metodologia da Pesquisa-ação para análise e compilação dos resultados a serem abstraídos das estruturas encontradas auxiliando na análise de dados biológicos.

3.6.2 Seleção dos entes biológicos

Com o auxílio da professora, pesquisadora e bióloga Dr^a. Emília Arruda do Laboratório de Anatomia Vegetal da Universidade Federal de Pernambuco (LAVeg) – no qual é coordenadora. Foram realizados estudos de anatomia

vegetal através de microscopia óptica – em que revela as estruturas dos tecidos celulares e as distribuições pelo pericarpo do fruto, através de feixe de luz.

As amostras em cortes transversais e longitudinais, submetidos à coloração e montados em lâminas apresentam imagens bidimensionais da estrutura celular dos frutos, no entanto dando ideia da sua forma estrutural e quantidade de extratos. O procedimento das lâminas histológica preparada com material botânico utilizou procedimento básico de fragmentação em seções finas com cortes longitudinais dos frutos, em porções pequenas para permitir que o fixador, corado com safrablau, atinja todas as suas células.

3.6.3 Microscopia Óptica Convencional

A anatomia vegetal estuda as células, os tecidos vegetais, observando as estruturas internas nos organismos vegetais. A observação precisa de materiais biológicos sob um microscópio óptico que envolve uma série de procedimentos preliminares, descritos abaixo. Estes procedimentos são muitas vezes referidos como técnicas de histologia em que se estuda as células e os tecidos vegetais.

As análises de anatomia vegetal visam preparar as amostras para estudo em microscopia de luz. No microscópico, geralmente, é realizado por luz transmitida, o que significa que a luz deve passar pelo objeto que está sendo examinado. Portanto, precisa-se obter fragmentos de tecido vegetal que será coletado em lâminas muito finas e transparentes (RUZIN, 1999).

Diante disso, foram coletadas amostras da região mediana (equatorial) dos frutos de *Theobroma cacao* (Malvaceae), *Passiflora circinnata* (Passifloraceae), *Artocarpus artilis*, *Hylocereus polyrhizus* para análises anatômicas. O material coletado foi fixado em FAA50 (JOHANSEN, 1940) por 48h, sendo, em seguida, conservado em etanol 70%.

As amostras conservadas em etanol 70% foram submetidas a pós desidratação em série etanol/butanol 50-100%, infiltradas e emblocadas em parafina histológica, e então seccionadas transversalmente e longitudinalmente com auxílio do micrótomo rotativo (Leica RM2125RT), como apresentado na fig.66 e 67, com uma espessura de 10µm. Os cortes obtidos foram desparafinados, corados com azul de Alcian e safranina, ambos 1% em etanol

50%, e montados de modo permanente em Bálsamo do Canadá (KRAUS & ARDUIN, 1997).

Figura 68 – Micrótomo rotativo Leica RM2125RT



Fonte: Google imagens

Figura 69 – Procedimento com o micrótomo rotativo



Fonte: autor

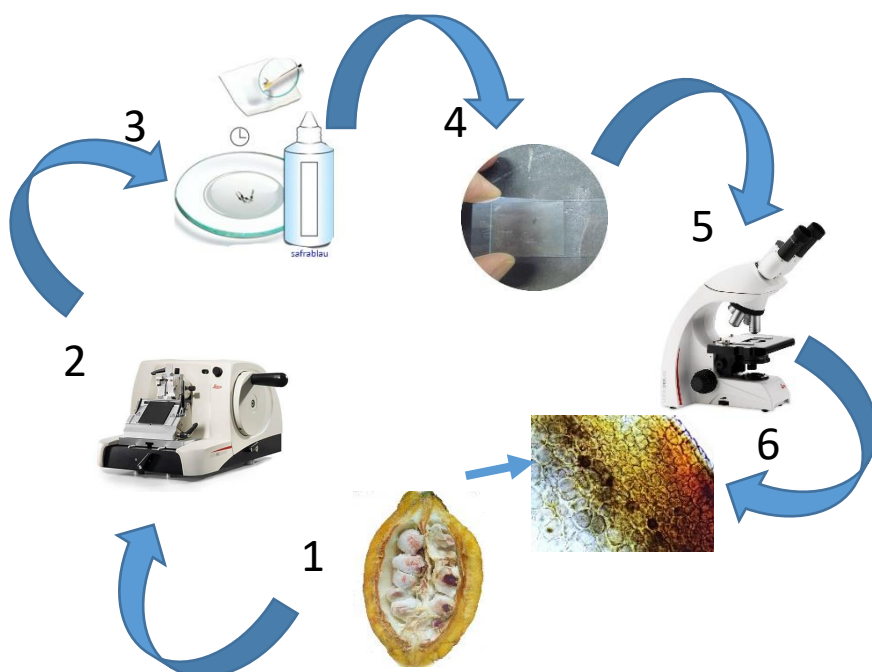
A partir das lâminas confeccionadas, foi feito o registro da estrutura geral do pericarpo dos frutos com auxílio do microscópio óptico Leica DM500, conforme a fig. 68, com câmera integrada ICC50 e do software LAS EZ 3.4.

Figura 70 – Micrótopo rotativo Leica RM2125RT



Fonte: Google imagens

Figura 71 – Fases da preparação para microscopia óptica, LAVeg- UFPE



Fonte: autor

Em seguida foram colocados em lâminas de vidro, denominada lamínula, resultando o preparo histológico de cada fruto selecionado para pesquisa exploratória. Para respectivamente seguir com as orientações, laudos técnicos, para contribuição e auxílio da objetiva para a fundamentação das estratégias que buscamos na pesquisa e na realização de procedimentos laboratoriais, conforme (KRAUS; ARDUIN, 1997; RUZIN, 1999).

Indicando qual o ponto de partida para investigação de teorias e definições em anatomia vegetal e entendimento da estrutura celular e estratégias biológicas contidas nas frutas tropicais selecionadas. Foram coletadas amostras na CEASA – Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco. Nas entrevistas e orientações, e laudos técnicos, tem contribuído e auxiliado de forma objetiva para a fundamentação das estratégias que buscamos na pesquisa e na realização de procedimentos laboratoriais, indicando qual o ponto de partida para investigação de teorias e definições em anatomia vegetal e entendimento da estrutura celular e estratégias biológicas do cacau, maracujá, fruta-pão e pitaia.

3.6.3.1 Cacau – *Theobroma cacao* L.

O cacau (*Theobroma cacao* L.) é principal fonte de matéria-prima na produção de chocolate e de seus derivados. Originário da Amazônia. Sendo um componente importante da economia de muitos países (CRUZ, 2012 apud LOPES et al, 2011).

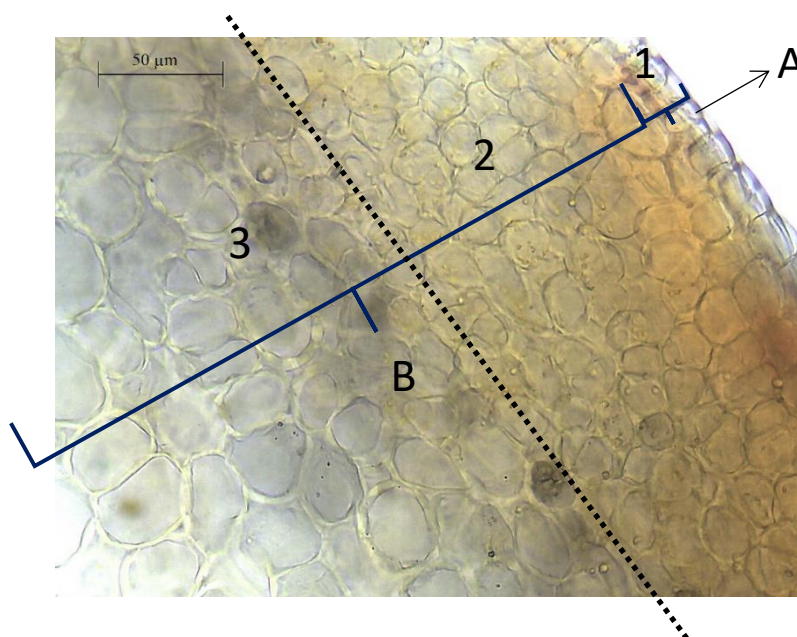
Seus frutos são bastante variados quanto à forma, ruga, aparência e coloração, pendem ao longo de todo o tronco da árvore. Possui característica de cápsula alongada, pentalocular, podendo ter a cor dourada ou vermelha. Sua superfície é percorrida por sulcos longitudinais e superficiais, sua de casca dura e de coloração desde amarelo-esbranquiçada até vermelho-escura, atingindo cerca de 20 cm de comprimento. Contém polpa mucilaginosa, branca ou rósea, envolvendo cinco fileiras de sementes avermelhadas. Frutificam de abril a setembro. O fruto pode ser considerado também como do tipo baga, elíptica, abaulada, com 10 sulcos longitudinais, contendo em média 20-40 sementes.

Figura 72 – Cacaueiro (*Theobroma cacao*) e Amostras do fruto



Fonte: (dir.) (cacaueiro); (esq.) autor

Figura 73 – Anatomia do pericarpo do cacau 1 - *Theobroma cacao* L.

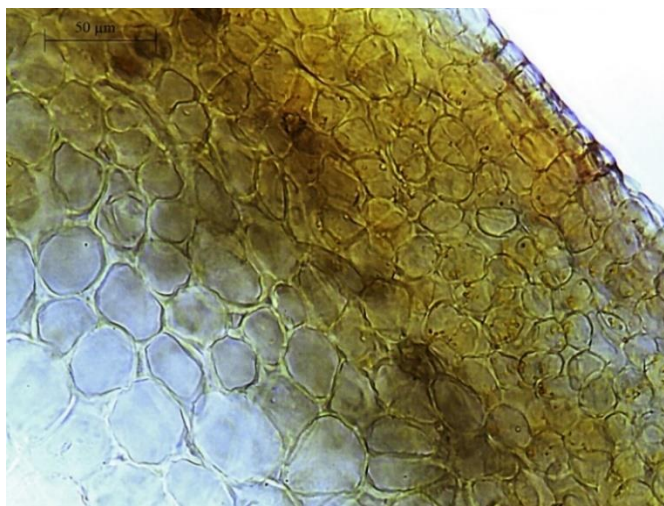


Fonte: autor

As legendas das imagens representam (A) Epicarpo com uma camada de células. (B) Mesocarpo com dois extratos de célula: um mais externo

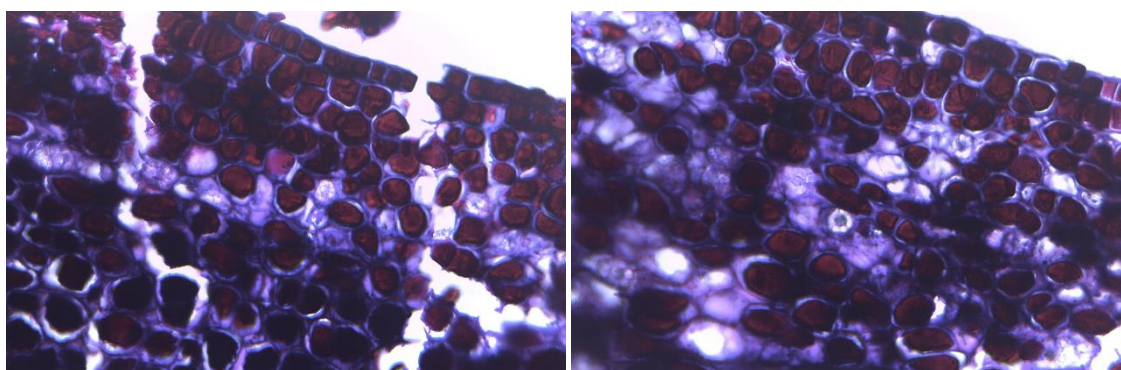
colenquimático e um mais interno parenquimático. O cacau é considerado um Anfissarcídio – fruto de origem placentar, pericarpo carnoso, com uma cavidade central, sem lóculos individualizados e cheia de sementes, envoltas por polpa (endocarpo) carnosa (suculenta).

Figura 74 – Anatomia do pericarpo do cacau 2 - *Theobroma cacao* L.



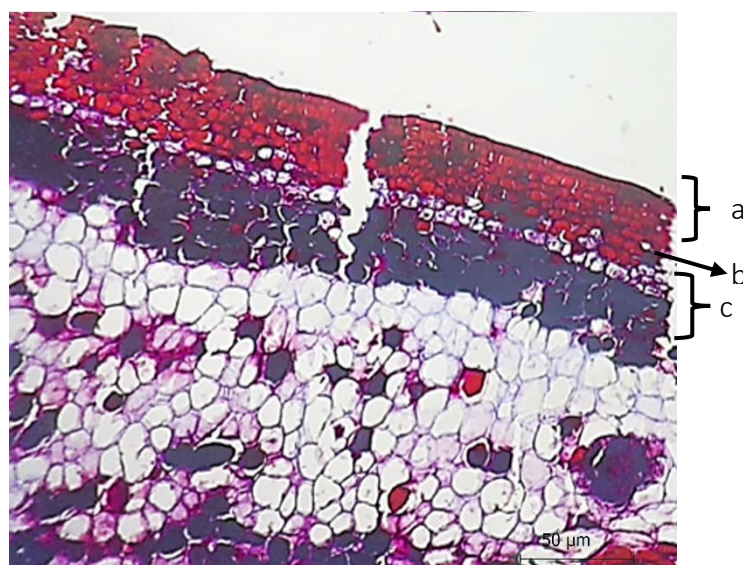
Fonte: autor

Figura 75 – Anatomia do pericarpo do cacau 3 - *Theobroma cacao* L.



Fonte: autor

Figura 76 – Anatomia do pericarpo do cacau 4 - *Theobroma cacao* L.



Fonte: autor

(a) Exocarpo (várias camadas de células) contendo células com conteúdo ou aparentemente lignificadas (CÉLULAS DE INTERESSE).

(b) Mesocarpo (1 camada de células de parênquima não lignificado).

(c) Mesocarpo contendo células aparentemente lignificadas (CÉLULAS DE INTERESSE).

3.6.3.2 Maracujá – *Passiflora*

O maracujá é uma denominação geral dada ao fruto e à planta de várias espécies do gênero *Passiflora*. O nome maracujá tem origem indígena Tupi e Guarani e significa ‘alimento que se toma de sorvo’ ou ‘alimento em forma de cuia’. A maioria das espécies de maracujá tem origem na América Tropical, envolvendo o Brasil, Colômbia, Peru, Equador, Bolívia e Paraguai, embora existam espécies nativas em países que vão dos Estados Unidos até a Argentina, além da Ásia, Austrália e China. O Brasil e a Colômbia são os países mais tradicionais no cultivo dos maracujás e também os países que têm a maior diversidade de espécies comerciais e silvestres (BERNACCI et al., 2005).

Figura 77 – Maracujazeiro



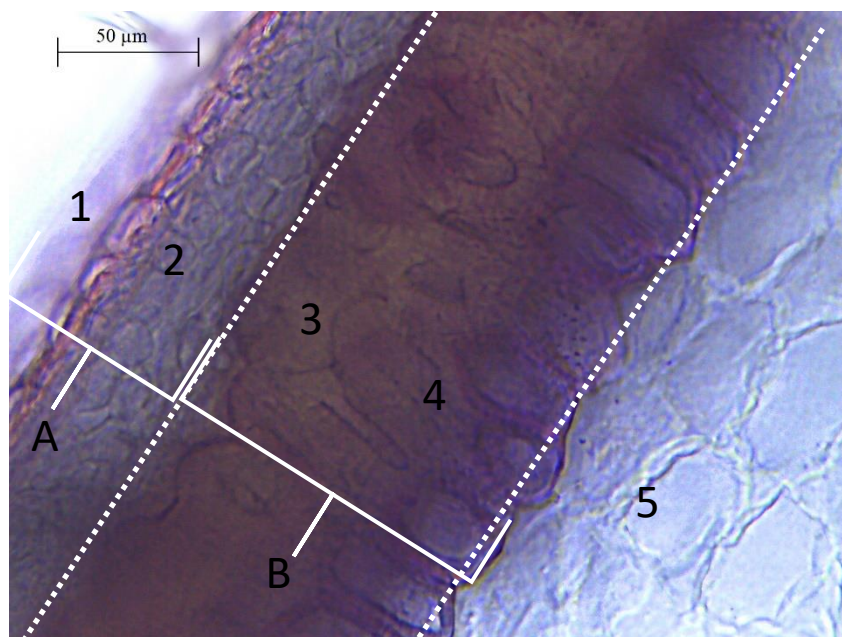
Fonte: google imagens

Figura 78 – Fruto do maracujá seccionado



Fonte: autor

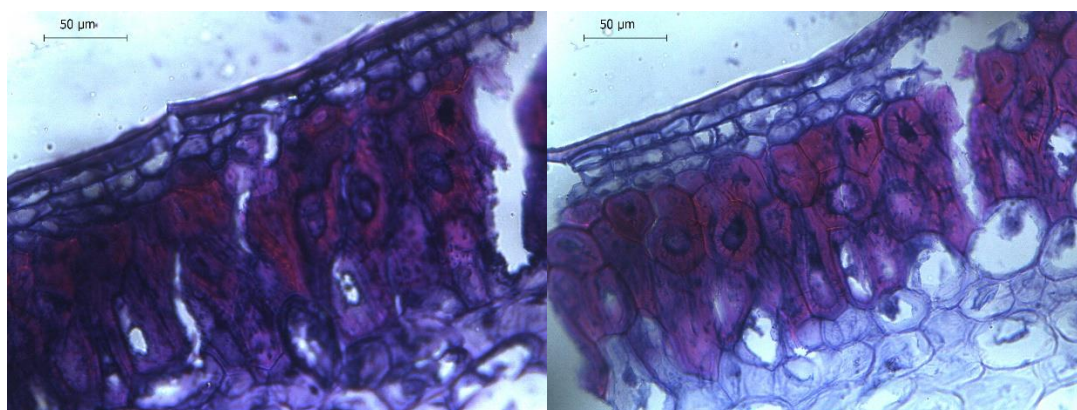
Figura 79 – Anatomia do pericarpo do maracujá 1 - *Passiflora*



Fonte: autor

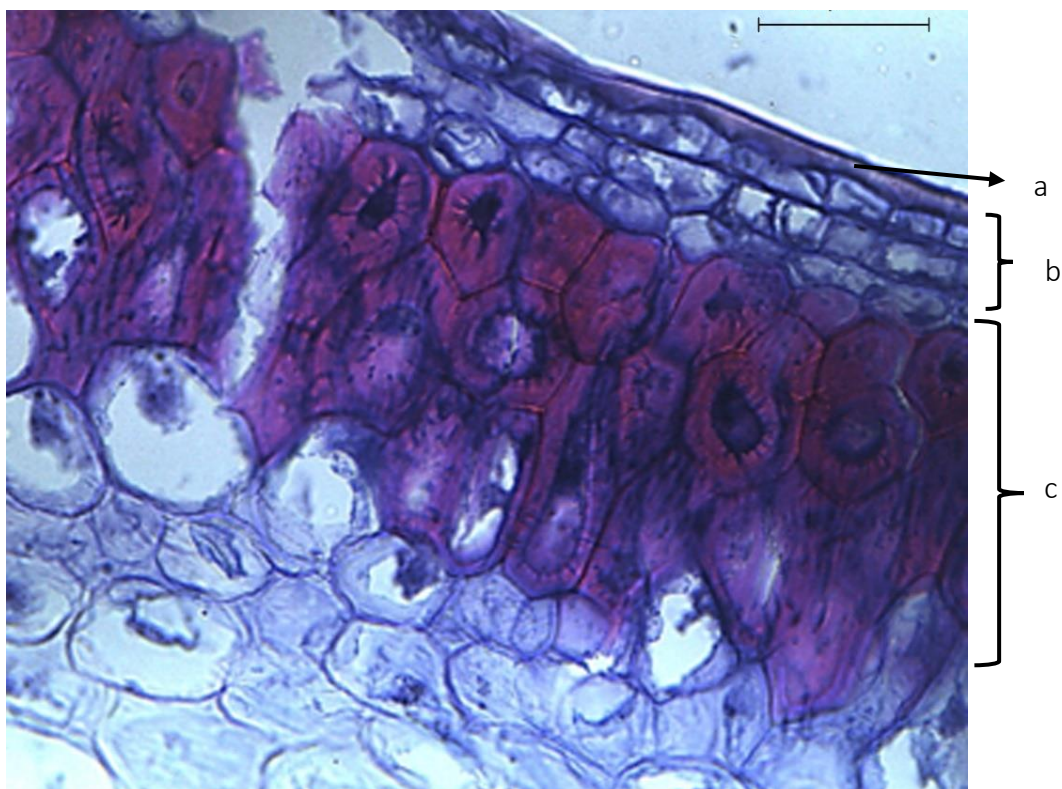
As legendas das imagens representam (A) Epicarpo com duas camadas de células. (B) Mesocarpo com três extratos: dois mais externos compostos por células de resistência (esclereídes) e um mais interno por células parenquimáticas.

Figura 80 – Anatomia do pericarpo do maracujá 2 - *Passiflora*



Fonte: autor

Figura 81 – Anatomia do pericarpo do maracujá 3 - *Passiflora*



Fonte: autor

(a) Cutícula.

(b) Exocarpo não lignificado (2-3 camadas de células).

(c) Mesocarpo (2-3 camadas de células) contendo células esclerificadas com diferentes orientações (CÉLULAS DE INTERESSE).

3.6.3.3 Fruta-pão - *Artocarpus altilis*

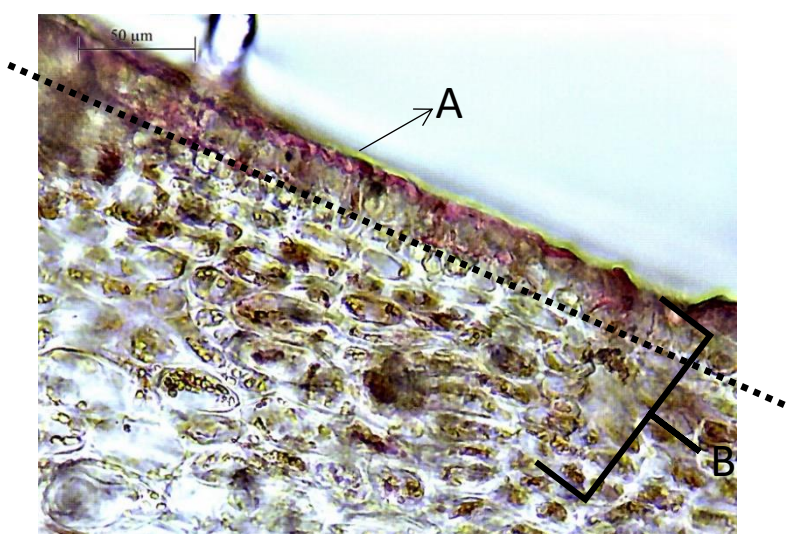
A Árvore da fruta-pão, originária da Oceania, foi introduzida no Brasil, no Pará, em 1801 e podem atingir de 15 a 20 m de altura. Os frutos sincárpicos são globosos ou oblongos, amarelo esverdeados, com 50 a 60 sementes de cor marrom-claro, usadas como alimento, cozidas ou assadas. A fruta-pão é adaptada às regiões tropicais, com temperatura de 20 a 35°C. Os frutos com sementes pesaram ao redor de 1 kg, com variação de 700 g a 1,6 kg.

Figura 82 – Imagem do epicarpo e secção do fruta-pão



Fonte: autor

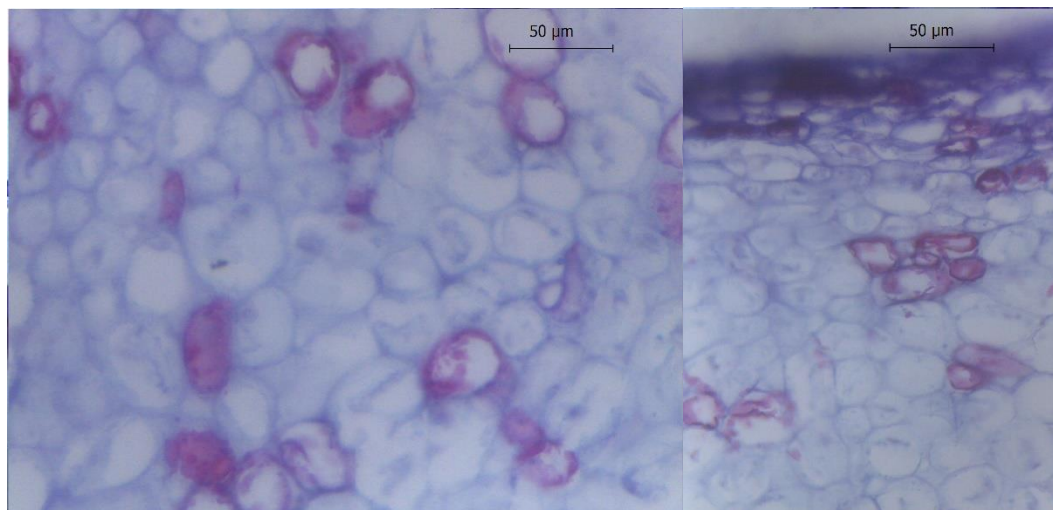
Figura 83 – Anatomia do pericarpo do Fruta-pão 1 - *Artocarpus altilis*



Fonte: autor

As legendas das imagens representam respectivamente: (A) Epicarpo com uma camada de células. (B) Mesocarpo com dois extratos de célula: um mais externo colenquimático e um mais interno parenquimático.

Figura 84 – Anatomia do pericarpo do Fruta-pão 2 - *Artocarpus altilis*



Fonte: autor

3.6.3.4 Pitaia - *Hylocereus polyrhizus*

Esse fruto é considerado um dos mais belos do mundo e é conhecido por vários nomes. Têm sua origem no México, Américas Central e do Sul e pertence à família Cactaceae e ao gênero *Hylocereus*. Assim, ele é batizado segundo algumas características observadas na planta. Um desses nomes é “rainha da noite”, por suas flores que se abrem em uma só noite. “Fruta do dragão”, ou Dragon Fruit, também é um dos nomes dados, e se deve às escamas presentes no fruto, que se assemelham com a pele de dragão (DIAS apud ANDRADE; MARTINS; SILVA, 2007). O nome “pitaia” originou-se do termo “pitahaya”, que significa fruta escamosa.

Figura 85 – Pericarpo da pitiaia e secção do fruto

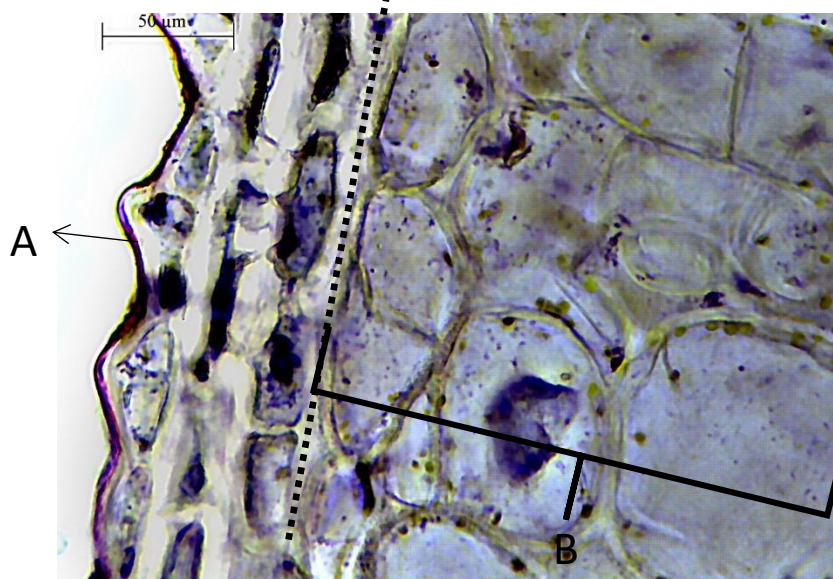


Fonte: autor

A parte comestível do fruto, o mesocarpo (polpa), possui diminutas sementes pretas distribuídas de forma homogênea e representa de 60 a 80% do peso em frutos maduros. Ela apresenta textura mucilaginosa e possui um rendimento de cerca de 55% do fruto, podendo variar entre as espécies (LIMA et al., 2013).

O fruto das pitaias vermelhas e brancas é uma baga que possui diâmetro de cerca de 10 a 20 cm, com formato globuloso e subglobuloso, apresenta coloração externa verde quando imatura e vermelha quando madura, além de ser coberto por brácteas (escamas). A polpa apresenta cores que variam do vermelho-púrpura brilhante ao branco, com inúmeras sementes escuras comestíveis que se encontram distribuídas por toda a polpa (ALVES; GODOY; CORREA, 2011; NUNES et al., 2014).

Figura 86 – Anatomia do pericarpo da pitiaia 1 - *Hylocereus polyrhizus*



Fonte: autor

As legendas representam: (A) Epicarpo com uma camada de células. (B) Mesocarpo com dois extratos de célula: um mais externo colenquimático e um mais interno parenquimático.

3.6.4 Caracterização elemento natural

Nessa fase da pesquisa será caracterizado os elementos biológicos, após a identificação com melhores características para o desenvolvimento da estrutura bioinspirada, em que está inserida na fase de abstração das estratégias biológicas, para princípios de design. Esta fase parte para a busca de uma área de aplicação para estruturas de dissipação de energia. Após a identificação de um conjunto aceitável de possibilidades, este é um passo importante a seguir. Uma etapa adicional de tradução agora é necessária para abstrair as estratégias naturais. De acordo com Baumeister (2014), quando se lê um estudo de caso, o processo de criação parece fácil e óbvio, mas a emulação de uma estratégia natural com uma solução humana exige um entendimento da biologia, uma tradução para projetar princípios e, em seguida, uma boa dose de criatividade.

Por esse motivo, a prática da biomimética precisa de uma equipe interdisciplinar, e a consultoria de biólogos da área se faz indispensável.

3.6.5 Anatomia Vegetal

De acordo com Chuncho; Chuncho; Aguirre, (2019) os objetivos da pesquisa, pode-se escolher um dos muitos ramos da anatomia vegetal, entre eles:

Anatomia descritiva – revela a estrutura dos tecidos vegetais e sua distribuição no corpo da planta.

Anatomia ecológica – ocupa-se em relacionar a estrutura interna das plantas com as condições ambientais.

Anatomia fisiológica – busca entender as funções dos diversos tecidos vegetais e relacioná-los com as atividades fisiológicas da planta.

Anatomia ontogenética – estuda a formação e desenvolvimento dos tecidos vegetais.

Anatomia aplica à sistemática – procura identificar estruturas que possam juntar ou separar grupos vegetais.

Dessa forma, espera-se que os conteúdos de anatomia vegetal possam ajudar na descoberta de fatos novos que venham enriquecer e dar direcionamento à pesquisa.

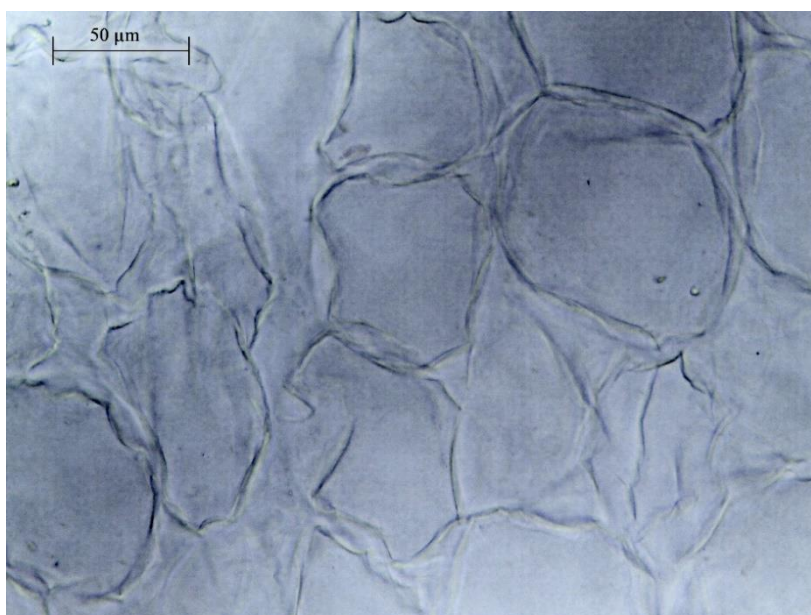
3.6.6 Parênquima, Colênquima e Esclerênquima

Originados a partir do meristema fundamental que pode ser dividido em apicais (protoderme, meristema fundamental e procâmbio) e laterais (felogênio e câmbio). O parênquima, o colênquima e o esclerênquima são tecidos simples, presentes no corpo primário da planta, pertencentes ao sistema fundamental e são originados (CHUNCHO, G.; CHUNCHO, C.; AGUIRRE, Z. H., 2019).

O parênquima é constituído de células vivas, considerado um tecido potencialmente meristemático, conserva a capacidade de divisão celular. Geralmente suas células possuem apenas paredes primárias delgadas, com grandes vacúolos e espaços intercelulares característicos (URIBE, 1991).

Esse tecido está distribuído em quase todos os órgãos da planta, apresentando funções essenciais como: fotossíntese, reserva, transporte, secreção e excreção. Comumente o parênquima se especializa para determinada função, podendo-se distinguir três tipos básicos de parênquima: de preenchimento, clorofiliano e de reserva. Dependendo da posição no corpo do vegetal e do conteúdo apresentado por suas células, os principais tipos de parênquima são: fundamental, clorofiliano, reserva, aquífero e aerênquima (CHUNCHO, G.; CHUNCHO, C.; AGUIRRE, Z. H., 2019).

Figura 87 – Células parenquimáticas do maracujá

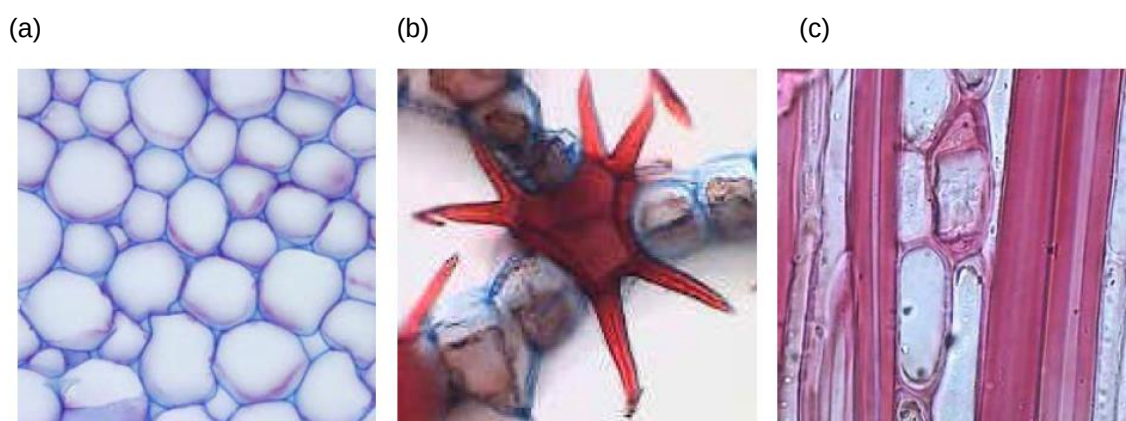


Fonte: autor

As colênquima lacunar - quando o tecido apresenta espaços intercelulares e os espessamentos de parede primária ocorrem nas paredes celulares que limitam estes espaços. Assim como o parênquima, é constituído de células vivas e é capaz de retornar à atividade meristemática. Possui parede primária com espessamento irregular, com campos primários de pontoação. Possui função de sustentação em regiões onde o crescimento é primário ou que estão sujeitas a movimentos constantes. Pode ser classificado de acordo com o tipo de espessamento da parede celular, podendo ser: angular; lamelar, lacunar e anelar.

A maioria das células encontradas nos vegetais são estáveis em forma. Isso depende do seu desenvolvimento ou especialização. Várias formas de células podem ser encontradas no corpo da planta, tais como: isodiamétricas (meristemas e parênquima), estreladas (células de pedra), alongadas (fibras esclerenquimatosas), tabulares (tecido epidérmico), poligonal (tecido epidérmico), reniforme (células-guarda: estômatos) (CHUNCHO, G.; CHUNCHO, C.; AGUIRRE, Z. H., 2019).

Figura 88 – Formas de células vegetais



Fonte: Retirado (CHUNCHO, G.; CHUNCHO, C.; AGUIRRE, Z. H., 2019). (a) Células isodiamétricas. (b) Células estreladas ou pétreas. (c) Células alongadas.

3.6.7 Estrutura anatômica do fruto

O fruto é composto do ovário no qual se origina pelo pericarpo e a semente. As paredes dos ovários dão origem ao pericarpo, já as sementes do ovário. O epicarpo é composto pelo exocarpo ou epicarpo, mesocarpo e endocarpo (URIBE, 1991).

PERICARPO – parede do fruto que o envolve; provém da parede do ovário maduro e é formado por três camadas: epicarpo, mesocarpo e endocarpo.

EPICARPO – camada externa dos frutos (do pericarpo); corresponde a epiderme. O mesmo que exocarpo.

MESOCARPO – camada mediana dos frutos (do pericarpo), ou seja, é a parte que fica entre o epi- e o endocarpo; corresponde ao mesófilo carpelar e é,

em geral, à parte mais desenvolvida do fruto; pode ser fibroso, farináceo, carnosos e comestível ou não.

ENDOCARPO – camada interna dos frutos (do pericarpo); corresponde a epiderme interna; a textura pode ser dura, lenhosa ou óssea.

Todas as três camadas podem estar presentes ou não nos frutos e apresentar mais de um extrato de células. O pericarpo representa, para alguns autores, as epidermes externas chamadas de exocarpo e interna de endocarpo, os demais tecidos representariam o mesocarpo e constituído, principalmente, por células parenquimáticas.

Na figura abaixo (A) Pedúnculo; (B) Epicarpo; (C) Mesocarpo; (D) Endocarpo (polpa) e (E) Semente. O maracujá é fruto conhecido como do tipo baga que são resultantes da múltipla fertilização dos ovários inferior e superior de um ou mais carpelos. Todos os tecidos do mesocarpo e endocarpo da parede do ovário se expandem em um tecido carnosos ou suculento e a camada exterior da pele é geralmente o exocarpo segundo (RIGOTTI & HIGUTI, 2011).

Figura 89 – Estrutura anatômica da fruta



Fonte: autor

3.6.8 MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)

As imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura foram realizadas nas primeiras semanas de outubro de 2022, finalizadas no início de novembro de 2022, no Centro de Microscopia Eletrônica da ESALQ (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, São Paulo. O trabalho foi executado em

colaboração acadêmica e contou 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.

Esse estudo, de microscopia eletrônica de varredura, foi realizado com 4 frutas: cacau (*Theobroma cacao* L.), maracujá (*Passiflora* sp), laranja (*Citrus*) e romã (*Punica granatum*). As frutas foram definidas através do método Delphi após as análises de anatomia por meio da microscopia óptica convencional. Após estas análises foram descartas para essa pesquisa duas frutas (fruta-pão e a pitaia) por não possuírem características com a finalidade desse estudo. Dessa forma foram inseridas mais duas frutas, a laranja e a romã formando dois grupos. O primeiro formado pela laranja e maracujá. O segundo formado pelo cacau e a romã para essa nova análise.

Figura 90 – Frutos selecionados para MEV



Fonte: google imagens.

Figura 91 – Microscópio Eletrônico de Varredura, JSM-IT300



Fonte: google imagens

JSM-IT300 é um Microscópio Eletrônico de Varredura, que pode ser operado com alto rendimento usando a operação do painel de toque e a fase de alta velocidade. A faixa de baixa pressão de vácuo de 10 a 650Pa estende a faixa de materiais que podem ser prontamente observados.

In Touch Interface A. Foi software de interface gráfica utilizado para produção das imagens e foi ajustado para que a área de trabalho possa ser otimizada durante a execução da análise ou do processamento de dados.

3.6.9 Secção criostática (criofratura)

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 corte de amostras de tecido. Os fragmentos foram seccionados em 50 micrômetros com orientação do corte longitudinal. Os cortes foram feitos e colocados nas lâminas previamente identificadas e arquivadas em caixas próprias em congelador -26°C e fixados. A inclusão foi realizada através da resina que em temperatura ambiente é líquida e à medida que se resfria a vai tornando-se sólida. Em seguida, é feita a preparação do bloco com o suporte e insere-se a navalha para efetuação dos cortes com a rotação da manivela para secção e posteriormente feita a coleta para montagem das lâminas para serem analisadas no microscópio eletrônico.

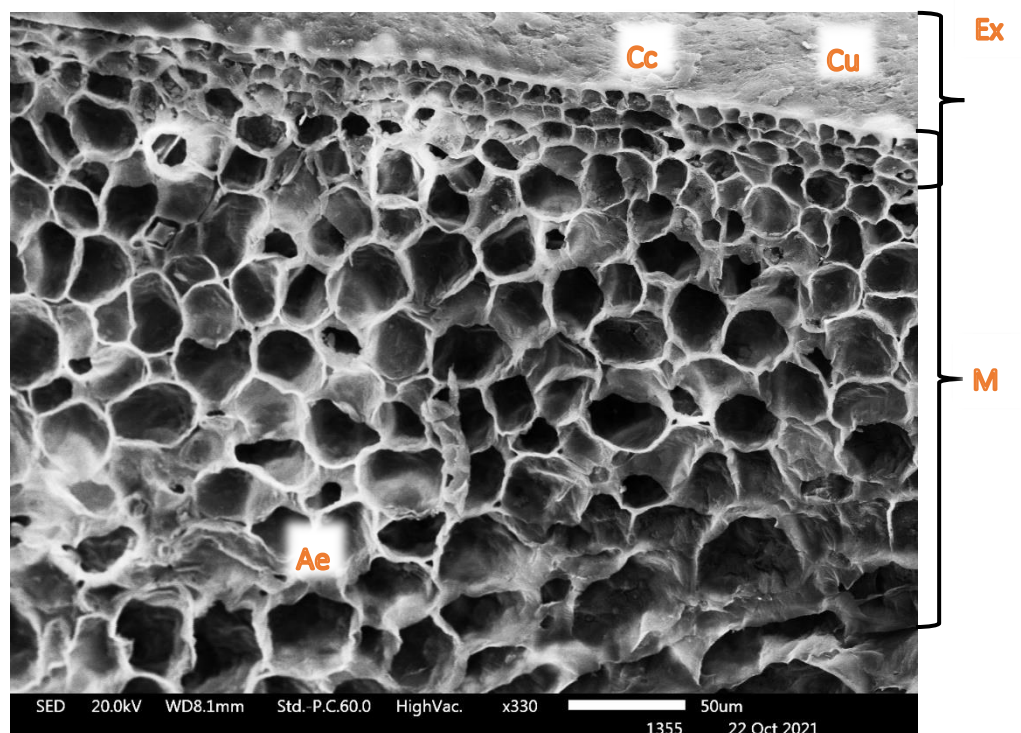
Figura 92 – Leica 1850® criostato



Fonte: google imagens

3.6.10 Laranja - *Citrus sinensis*

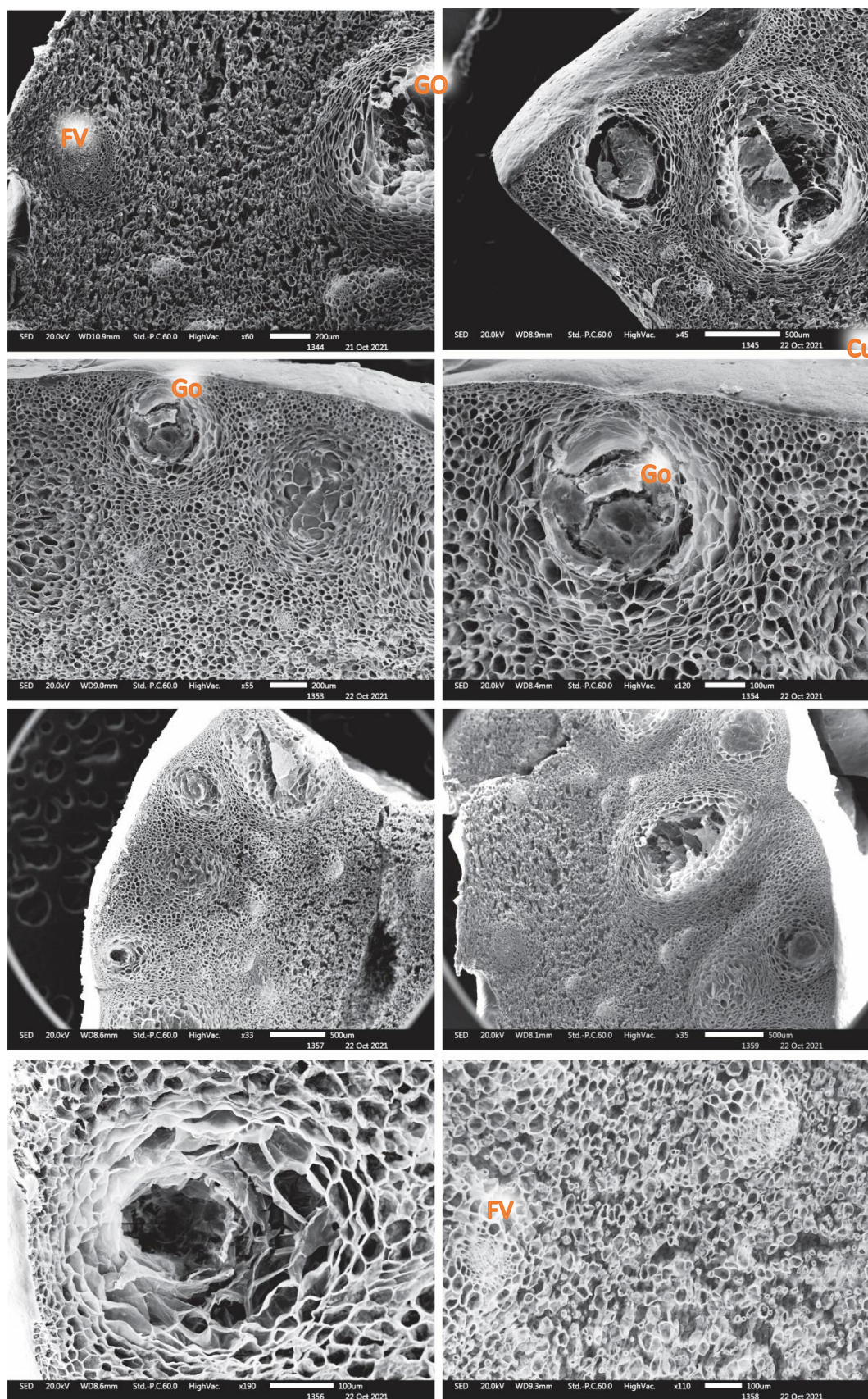
Figura 93 – MEV do Exocarpo e mesocarpo externo do *Citrus*



Fonte: autor

O *Citrus* é anatomicamente dividido em três camadas distintas. No entanto o endocarpo ou polpa, não representado na figura 92, não corresponde a área de interesse desse estudo. Flavedo ou exocarpo (Ex) é evidenciado na parte mais externa é denominado, que inclui a cutícula (Cu), a epiderme e a hipoderme que contêm as glândulas de óleo (GO) que apresenta número e tamanho variáveis de acordo com a espécie e a variedade cítrica (Fig. 93B). Na parte mais interna da casca, denomina-se albedo ou mesocarpo (M). (Cc) células compactadas. (Cp) células parenquemais. (FV) feixes vasculares que corresponde é um dos elementos que constituem o sistema de transporte das plantas vasculares. (Ae) Aerenquima é uma especialização do tecido parenquimático em que se desenvolvem grandes espaços intercelulares preenchidos por gases, geralmente interligados, formando uma fase gasosa contínua que se ramifica por todo o tecido (MAUSETH, 1988).

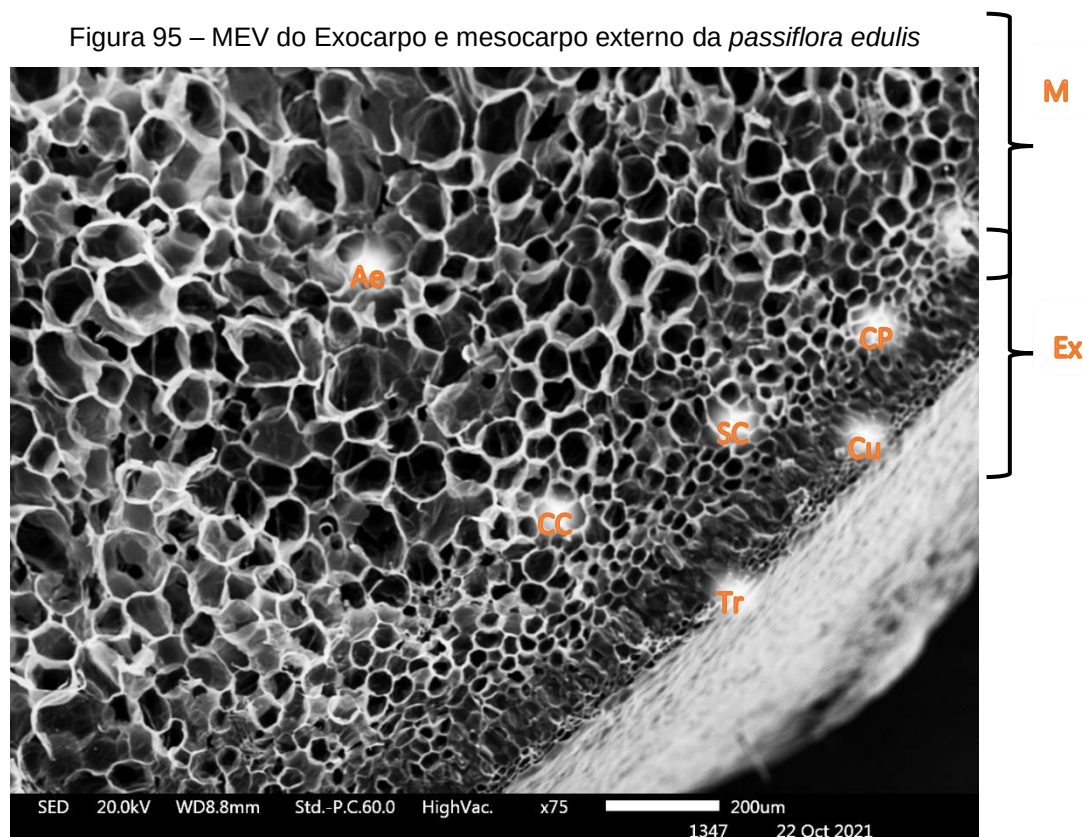
Figura 94 – Conjunto de imagem de MEV da *Citrus sinensi*



Fonte: autor e colaboração com ESALQ

3.6.11 Maracujá - *Passiflora edulis*

Figura 95 – MEV do Exocarpo e mesocarpo externo da *passiflora edulis*



Fonte: autor e colaboração com ESALQ

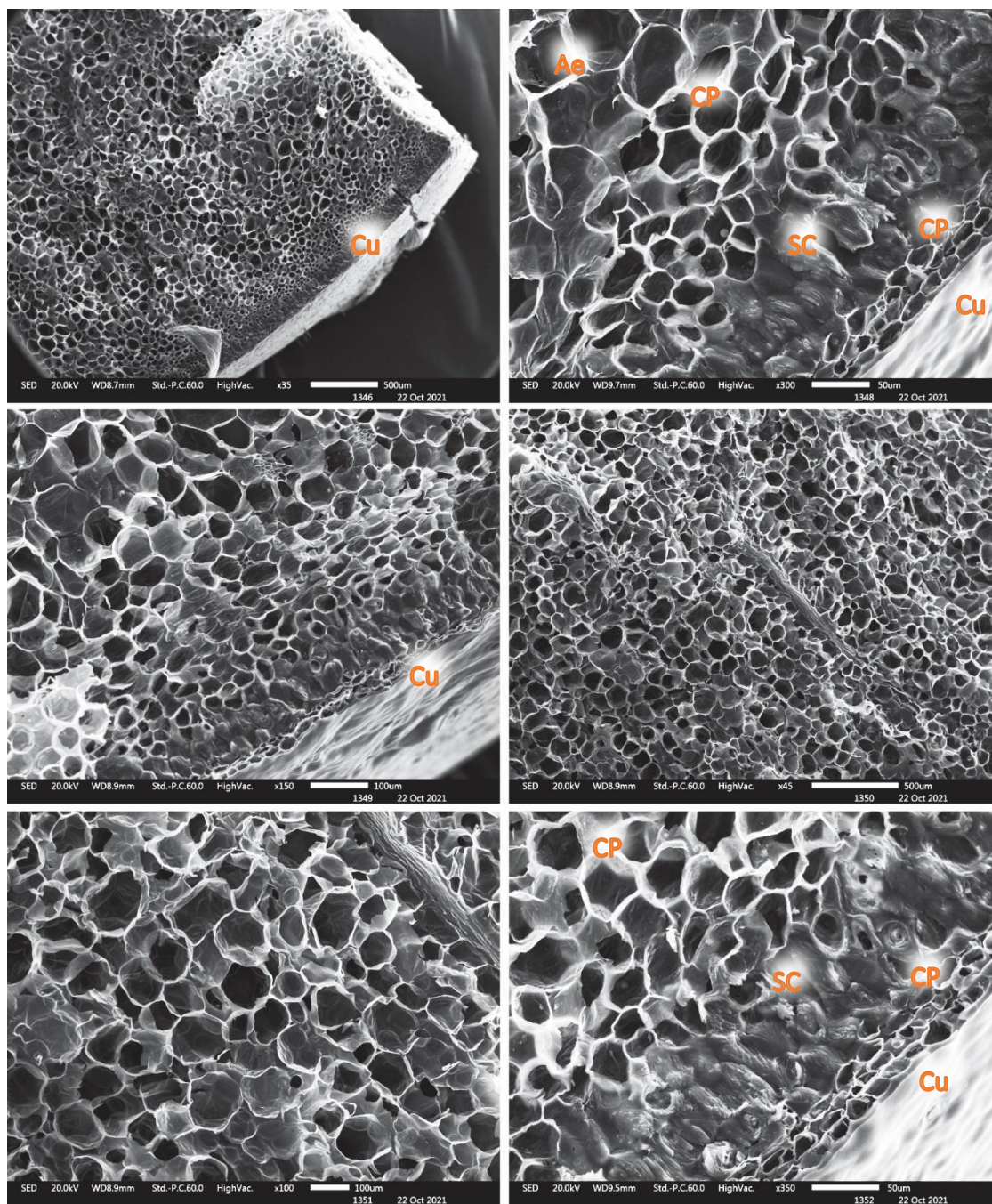
Pericarpo de *Passiflora* é composto por três regiões anatomicamente distintas: exocarpo, mesocarpo e endocarpo (SOUZA et al. ,2006). No exocarpo (Ex) consiste em uma camada uniestratificada com células trapezoidais, intercaladas por flanges cuticulares e recobertas por uma espessa cutícula lipídica.

A presença de várias camadas de células parenquimatosas, arredondadas foi encontrada no mesocarpo médio com um diâmetro progressivamente crescente das camadas mais externas para as mais internas. Por outro lado, o mesocarpo interno é formado pelo parênquima frouxo, que contém parênquimas aeríferos ou aerênquimas (Ae) e parênquima lacunoso ou esponjoso, constituídos por células com grandes espaços entre elas, que formam cavidades preenchidas de ar, constituído por células parenquimatosas

maiores com grandes espaços intercelulares composição semelhante à descrita por (CARVALHO; MAPELI; & OLIVEIRA, 2021).

O (Sc) esclerênquima é um tecido de sustentação caracterizado pela resistência e elasticidade apresentada por suas paredes celulares. Uma parede elástica pode ser deformada sob tensão ou pressão, mas reassume sua forma e tamanho originais quando essas forças desaparecem. Se um órgão maduro fosse constituído unicamente de tecidos plásticos, as deformações causadas pelos mais variados agentes como: o vento, passagem de animais e outros, seriam permanentes. Por outro lado, a planta deve oferecer resistência às peças bucais, unhas e ovoposidores de animais. A presença de esclerênquima, como uma camada protetora ao redor do caule, sementes e frutos imaturos evita que os predadores se alimentem deles, uma vez que a lignina não é digerida pelos animais, assim o esclerênquima funciona como um mecanismo de defesa para a planta.

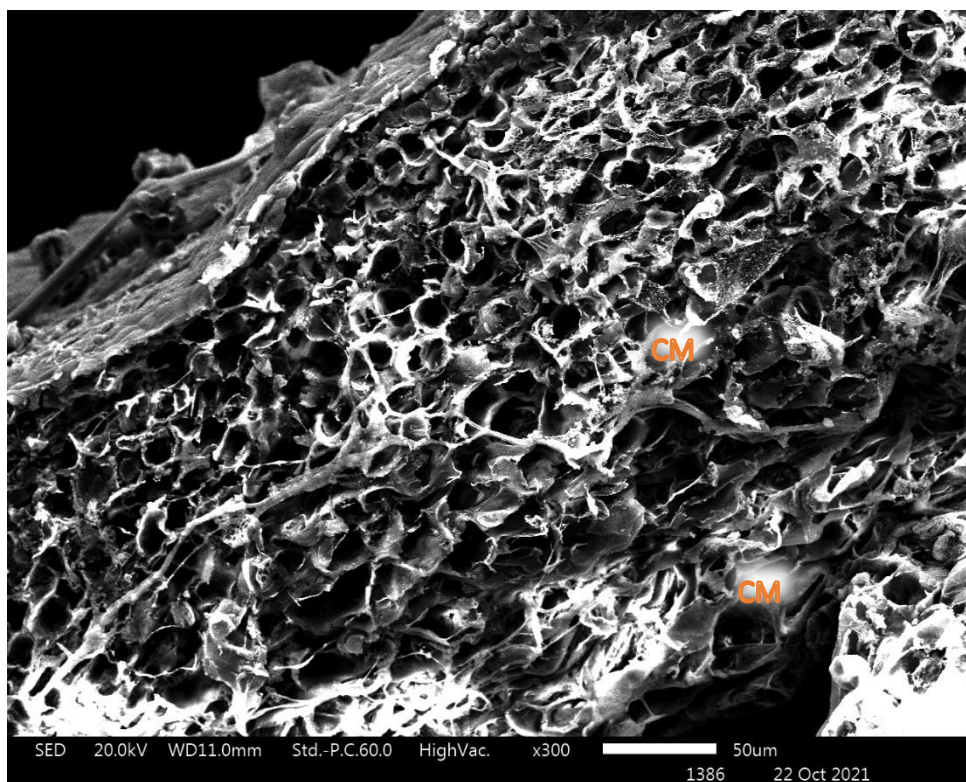
Figura 96 – Conjunto de imagem MEV da *Passiflora edulis*



Fonte: autor e colaboração com ESALQ

3.6.12 Cacau - *Theobroma*

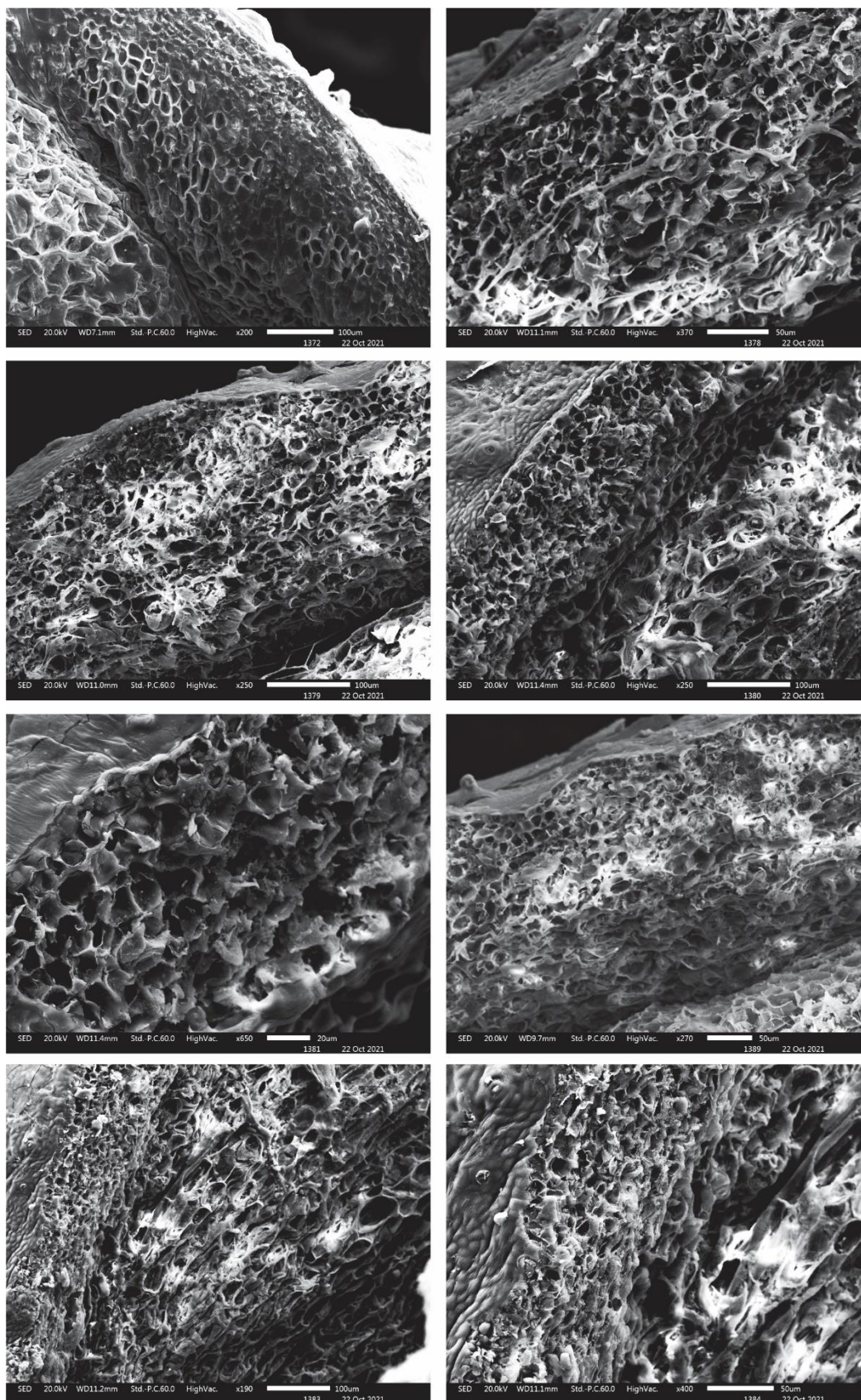
Figura 97 – MEV do Exocarpo e mesocarpo externo do *Theobroma L.*



Fonte: autor e colaboração com ESALQ

A camada esclerenquimática está localizada na zona média do mesocarpo. Com zona periférica esclerenquimática do pericarpo, enquanto a zona interna do mesocarpo e endocarpo são parenquimatosas. (CM) cavidade mucilaginosa.

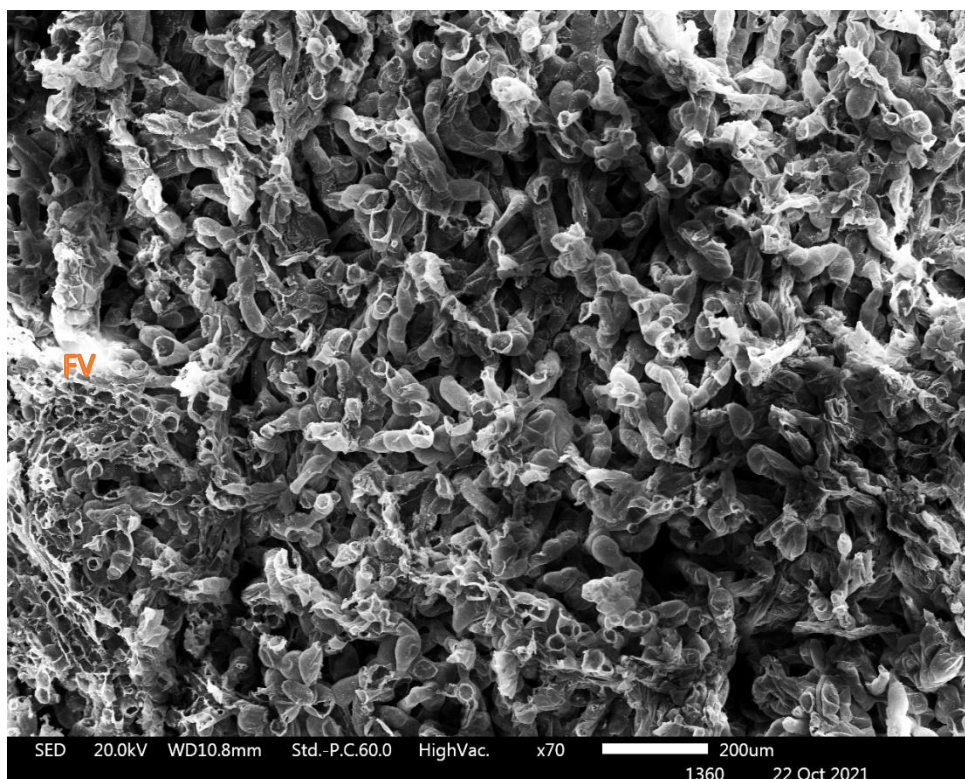
Figura 98 – Conjunto de imagem MEV do *Theobroma L.*



Fonte: autor e colaboração com ESALQ

3.6.13 Romã - *Punica granatum*

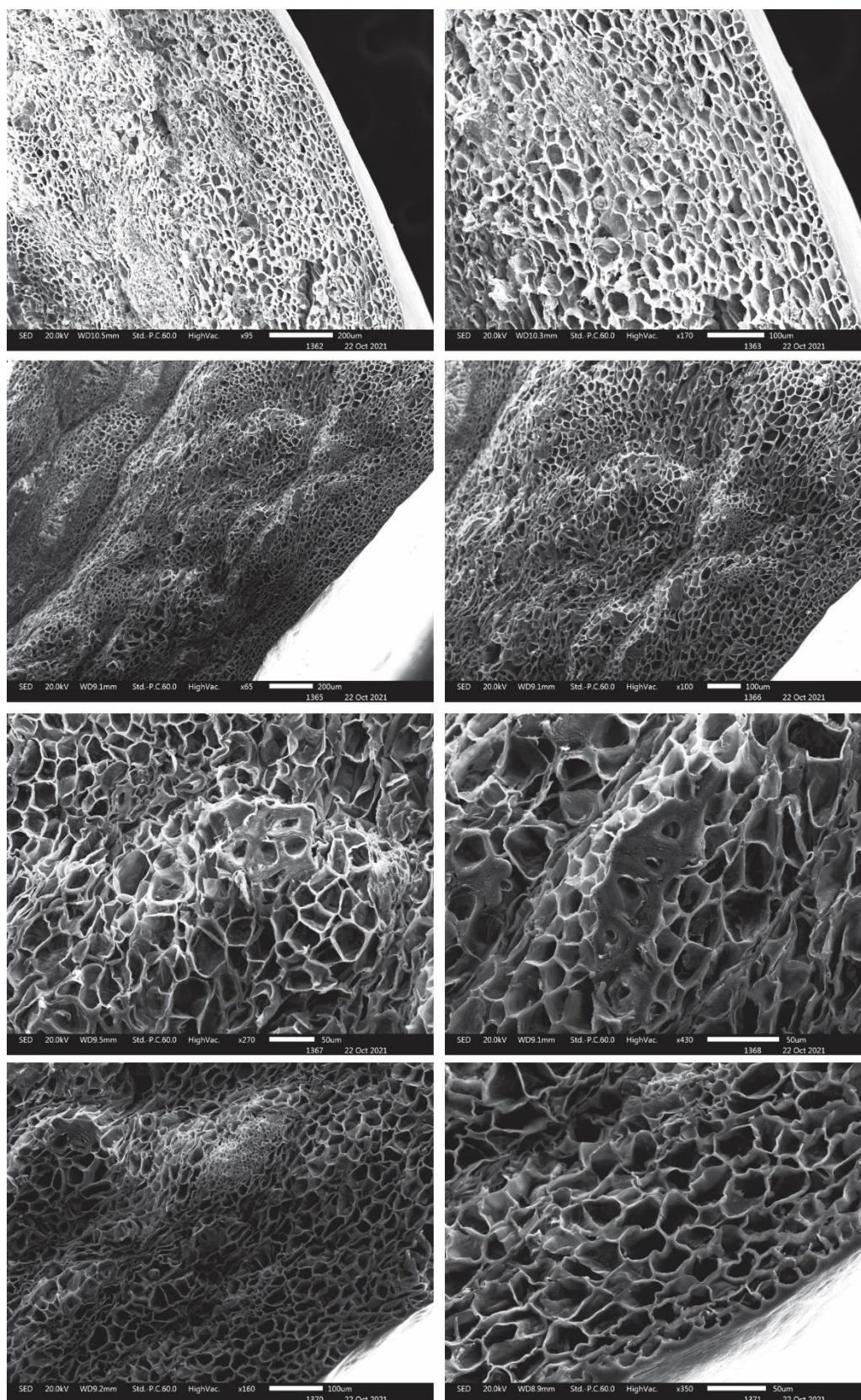
Figura 99 – MEV do Exocarpo e mesocarpo externo da *Punica granatum*



Fonte: autor e colaboração com ESALQ

Observações microscópicas neste estudo mostraram que há uma camada de (Cu) cutícula na superfície externa (pericarpos) da casca dos frutos de romã seguida de células epidérmicas organizadas por uma camada imediatamente abaixo da cutícula. Verificou-se que as células do esclerênquima e os feixes vasculares estavam presentes entre as células do parênquima que estão localizadas sob as células epidérmicas. A epiderme forma a camada celular mais externa na estrutura da casca da romã. A função mais importante da epiderme é proteger a fruta dos efeitos ambientais externos e fornecer troca de gás e vapor de água (DICKINSON, 2000). As células parenquimais da casca da romã estão na forma isodiamétrica – Células de formato regular, apresentando todos os diâmetros aproximados. e os feixes vasculares e as células do esclerênquima estavam localizados entre as células parenquimáticas. Verificou-se que as células protetoras do esclerênquima estavam densamente distribuídas na casca do fruto. (FV) feixes vasculares.

Figura 100 – Conjunto de imagem de MEV da *Punica granatum*

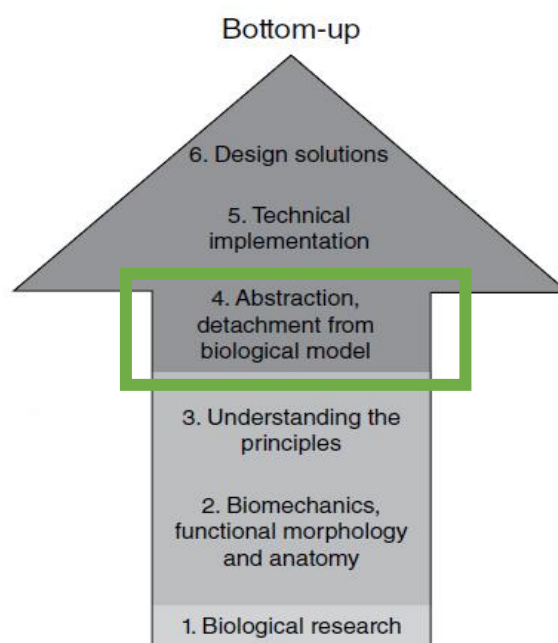


Fonte: autor e colaboração com ESALQ

3.7 FASE 3 – Criando

3.7.2 Micro-CT (Microtomografia de raio -x)

Figura 101 – Compreendendo os princípios



Fonte: Adaptado Biomimicry 3.8

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

O software VGstudio Max VGSTUDIO MAX é um pacote de software para análise e visualização de dados de voxel. É usado em uma variedade de áreas, como tomografia computadorizada industrial, pesquisa médica, ciências da vida, animação e outros. Os módulos utilizados nesse estudo foram:

- a) *CT Reconstruction*: Através de algoritmos as imagens escaneadas são passíveis de digitalizações tridimensional. Os do VGstudio Max para reconstrução de TC utiliza última geração de técnicas para redução de artefatos para obter o máximo de seus dados de raio-x utilizado.
- b) *Analyze designed material properties*: Na figura 107 revela o que está abaixo da superfície de suas peças digitalizadas. dessa forma pode-se investigar e quantificar de forma abrangente as propriedades do material de suas peças usando testes não destrutivos (NDT). Analise as propriedades do material projetado, bem como as descontinuidades e visualizá-las - a partir de pesquisa e desenvolvimento para as etapas de produção.
- c) *Foam Analysis*: Determina as estruturas celulares em espumas porosas. Dessa maneira pode-se subdividir células conectadas para quantificar individualmente os tamanhos e formas das células. As espessuras das hastes podem ser visualizadas localmente e agregadas a estatísticas globais, como por meio de histogramas.
- d) *Porosity/Inclusion Analysis*: oferece vários algoritmos de análise de porosidade/inclusão para garantir a detecção de porosidade ideal para cada peça, adequado para conjuntos de dados multimateriais com avaliação de porosidade personalizada e seleção de porosidade.

Essa etapa da pesquisa foi desenvolvida colaboração como o DEN-UFPE (Departamento de Energia Nuclear) em janeiro de 2022. Utilizou-se o XT H 225 ST (fig. 102) para a captura das imagens de microtomografia Computadorizada de Raio-x (Micro-CT) e a medição detalhadas de componentes internos que são necessários para os recursos de reconstrução tridimensional, análise de falhas e pesquisa de materiais.

O XT H 225 ST oferece uma fonte de raios X microfoco, um volume de inspeção para acomodar peças de pequeno a médio porte e alta resolução de imagem. A geração de Raios X ocorre entre um filamento de tungstênio (cátodo)

e um alvo de tungstênio (ânodo) em tensão aplicada ao tubo de Raios X (Fig.103) de até 225kV e corrente elétrica máxima de 2 mA.

Do ponto de vista de aplicação desse estudo, foi a primeira vez em que o scanner do Departamento de Energia Nuclear (DEN-UFPE) foi utilizado para mapeamento em frutas (amostras vegetais) apesar da sua ampla gama de aplicações, incluindo a inspeção de peças plásticas, pequenas peças fundidas e mecanismos complexos, bem como pesquisa de materiais e espécimes naturais.

Figura 102 – *Industrial CT Scanning* - XT H 225 ST

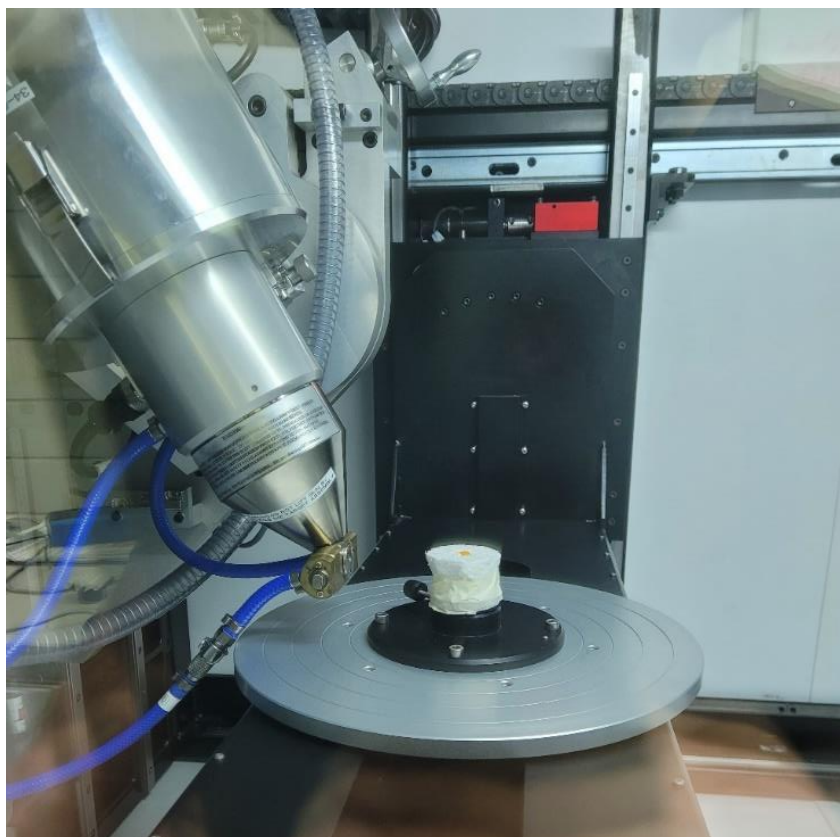


Fonte: autor em colaboração com DEN

O detector desse dispositivo possui 1918 x 1534 sensores (Fig.69), o equipamento também dispõe de um conjunto de filtros de diferentes materiais e espessuras que são utilizados na saída do tubo com a finalidade de diminuir o efeito *beam hardening*, no qual, resulta em uma contagem de densidade errônea,

fazendo com que o algoritmo de reconstrução das imagens converte erroneamente as informações, gerando assim uma imagem não verídica.

Figura 103 – Vista interna do XT H 225 ST com amostra do *Citrus*



Fonte: autor em colaboração com DEN

A tomografia computadorizada, também é usada para obter uma visão interna de peças industriais complexas, observando a estrutura interna. Nesse estudo foi utilizada para uma observação não invasiva nas amostras vegetais. Desse modo o uso do recurso do Micro-CT foi qualificado para quantificar qualquer dimensão interna ou externa em um processo suave, rápido e não destrutivo (não invasivo) nas amostras vegetais.

Apesar desse procedimento obter imagens de um modo não invasivo, foi-se necessário fazer o escaneamento em pedaços menores para se obter uma melhor resolução das estruturas internas dos frutos. Obteve-se imagens de raio-x de pedaços das amostras e dos frutos inteiros como mostra a figura a seguir.

O menor pedaço da amostra que pode ser ampliado no escaneamento é de 5.5 x 5.5 mm. Para essa medição utilizou-se o paquímetro digital e os cortes foram realizados na hora do escaneamento com navalhas e com cuidado para não danificar as estruturas das paredes celulares das amostras.

Figura 104 – Coletas das amostras da laranja



Fonte: autor

Figura 105 – Coletas das amostras das frutas e escaneamento dos frutos inteiros



Fonte: autor em colaboração com DEN

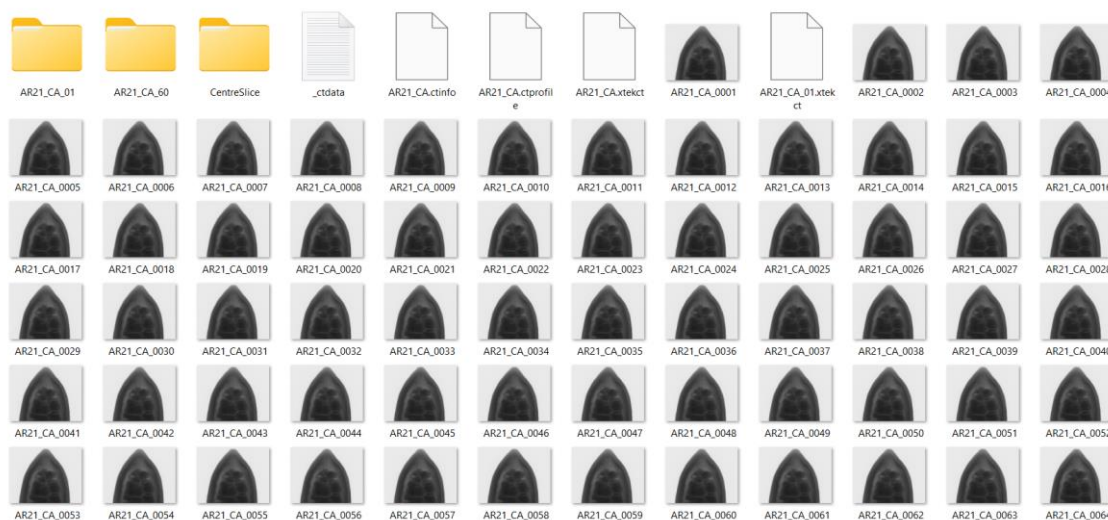
No computador de aquisição (fig. 106a) no próprio laboratório são estabelecidos os parâmetros utilizados durante o processo de captura das projeções (Fig. 106b). As aquisições das diversas imagens foram realizadas ao longo de uma rotação de 360° com passos precisos em que as amostras foram submetidas.

Figura 106 – (a) Equipamento e visualização do raio-X. (b) Escaneamento do cacau



Fonte: autor em colaboração com DEN

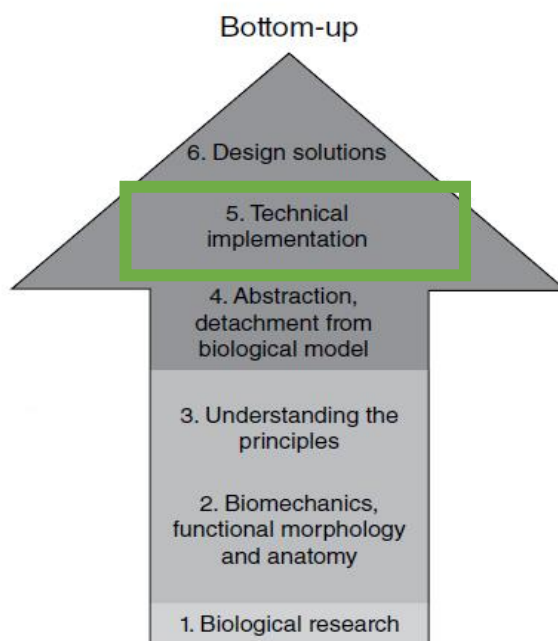
Figura 107 – escaneamento do cacau



Fonte: autor em colaboração com DEN(UFPE)

3.7.3 Reconstrução tridimensional

Figura 108 – Abstração e inspiração biológica



Fonte: Adaptado Biomimicry 3.8

A reconstrução tridimensional consiste em montar imagens tridimensionais a partir de várias imagens planas resultantes da varredura do elemento medido na posição angular selecionada. A peça é fixada em uma mesa rotativa que permite o movimento, posicionamento linear e angular do componente a ser escaneado. Enquanto o objeto medido é iluminado por um feixe de raios X gerado no tubo, a detecção da imagem é feita em determinadas posições angulares da mesa rotativa na matriz do detector. As imagens adquiridas são processadas por software especializado, produzindo um modelo tridimensional do elemento medido (KOWALUK; WOŹNIAK, 2012).

Após a etapa de escaneamento a imagem tridimensional é reconstruída. Na reconstrução de TC, imagens de raio-x 2D são tiradas de diferentes ângulos e são combinadas para criar um conjunto de dados 3D o total são 3017 imagens resultando um total de 16Gb de armazenamento em disco para cada amostra. As imagens podem ser geradas com diferentes métodos de imagem de raio-x.

Mas nem todos os métodos de imagem de raio-x de Tomografia computadorizada são adequados para todas as aplicações. Dependendo do problema, do material do objeto, do tamanho do objeto, do tempo de ciclo e da qualidade necessária, diferentes componentes de TC (tubo de raios X, detector de raios X, manipuladores) ou sistemas completamente diferentes devem ser usados. Por exemplo, imagens com TC de feixe cônico (CBCT) ou TC helicoidal (também chamada de TC helicoidal) permitem tempos de aquisição curtos para objetos/componentes grandes.

O Line CT oferece uma representação de objeto com um nível de artefato muito baixo (radiação espalhada). Para reconstrução foi utilizado o software da Volume Graphics (VGStudio Max) do DEN que oferece os algoritmos de reconstrução de TC certos para as imagens escaneadas, para construção das digitalizações. Abaixo segue as configurações para aquisição das imagens nas frutas no XT H 225 ST.

Quadro 9 – configuração do scanner

X	Amostra	Escaneamento	Tensão	Corrente	Tamanho de Pixel	HD Externo
1	AR21_MA	Maracujá	50kV	180µA	5µm	26/10/2021
2	AR21_RO	Romã	120kV	100µA	60µm	26/10/2021
3	AR21_CA	Cacau	60kV	200µA	60µm	15/10/2021
4	AR21_CA2	Cacau2	60kV	200µA	5µm	15/10/2021
5	AR21_LA	Laranja	120kV	100µA	50µm	09/11/2021
6	AR21_LA2	Laranja2	60kV	200µA	10µm	18/11/2021

Fonte: autor

A tensão em algumas frutas foi testada com valores diferentes, assim como a corrente, devido as densidades dos materiais e quantidades de líquidos abundante nas amostras, pois os escaneamentos foram obtidos com as frutas *in natura*. Em algumas frutas a tensão mais baixa proporcionou uma visualização melhor para reconstrução. Todos os escaneamentos foram feitos sem a utilização de filtros físicos adicionais.

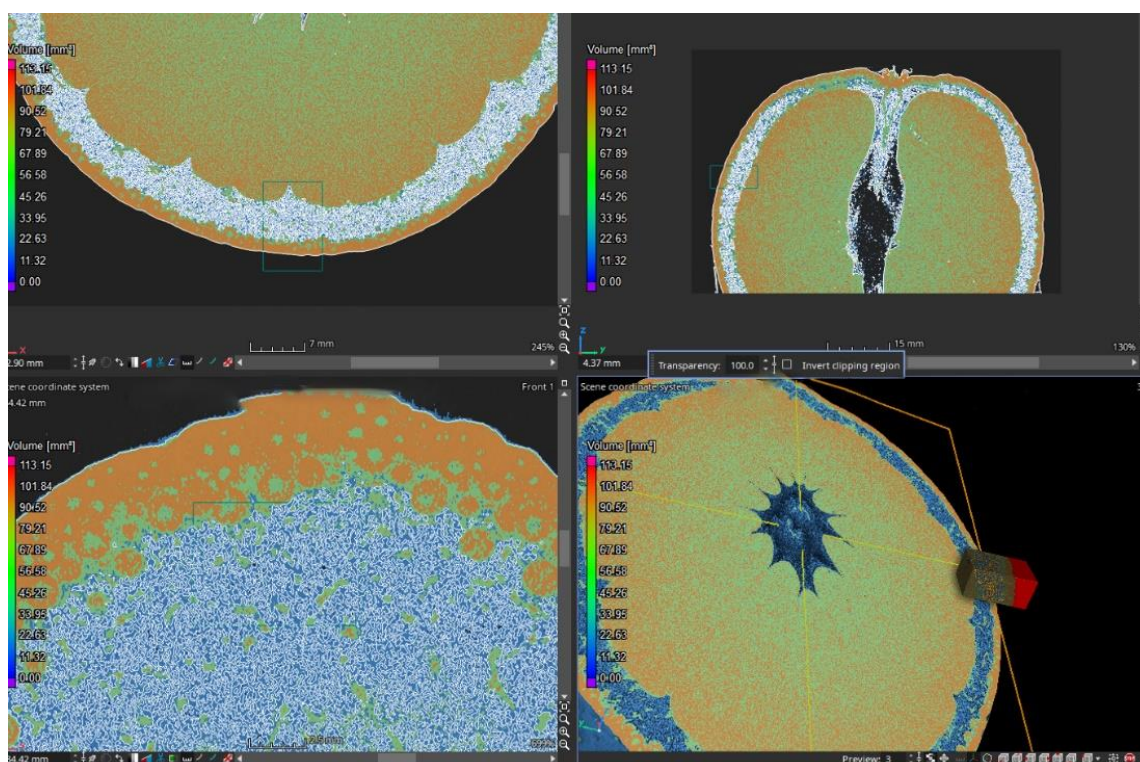
Com o módulo *Volume Meshing*, foi possível converter tomografias em malhas tetraédricas com alta conformidade geométrica. Além das amplas opções para otimização e refinamento de malha, o VGSTUDIO MAX ofereceu a

possibilidade de criar conjuntos de entidades para definir condições de contorno em um software FEM (Estudos de Elementos Finitos).

3.7.4 Determinação de superfície e materiais

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 109 – Determinação de superfície no VGStudio Max



Fonte: Autor

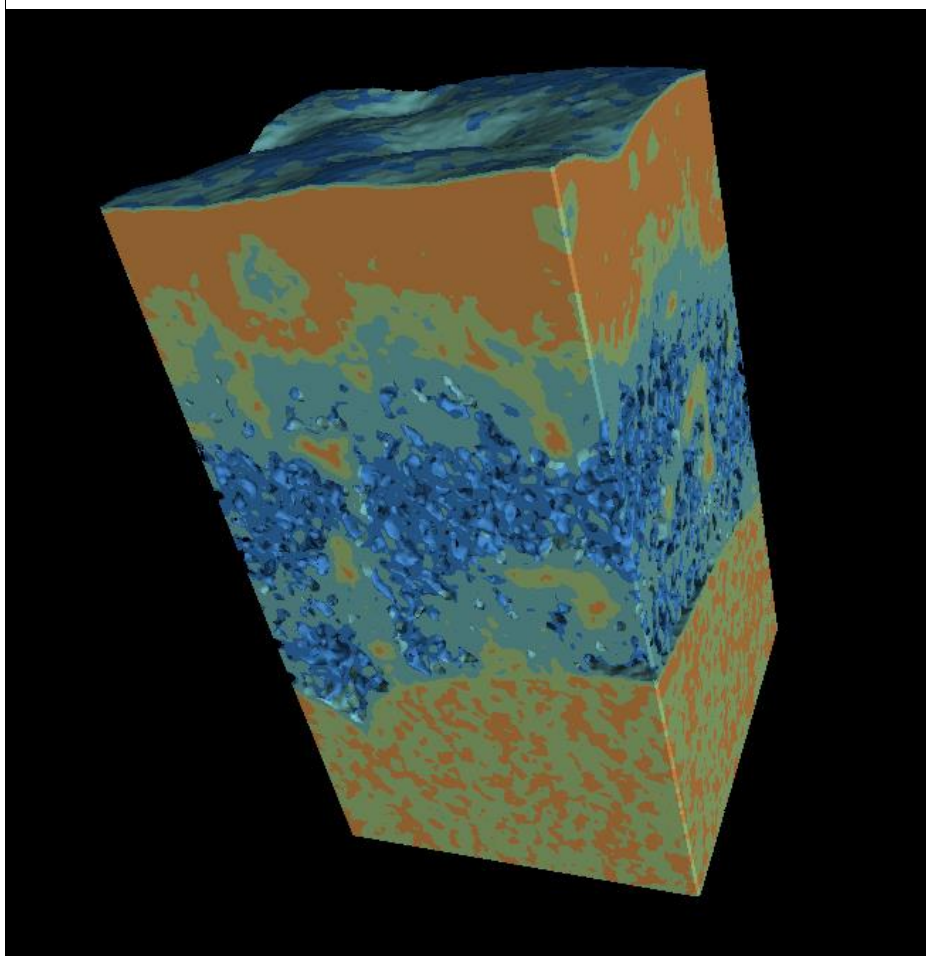
Na fig. 109 é apresentada a interface do software do VGStudio Max e a respectiva determinação da superfície. O carregamento do conjunto de dados e determinação da superfície é feito com método adaptativo local para remoção de “ruídos” para reduzi-lo o potencialmente dentro dos defeitos de desempenho da

determinação da superfície e a precisão da escala dimensional de dados extraídos do escaneamento de raio-x.

3.7.5 Seleção da área de interesse (RoI)

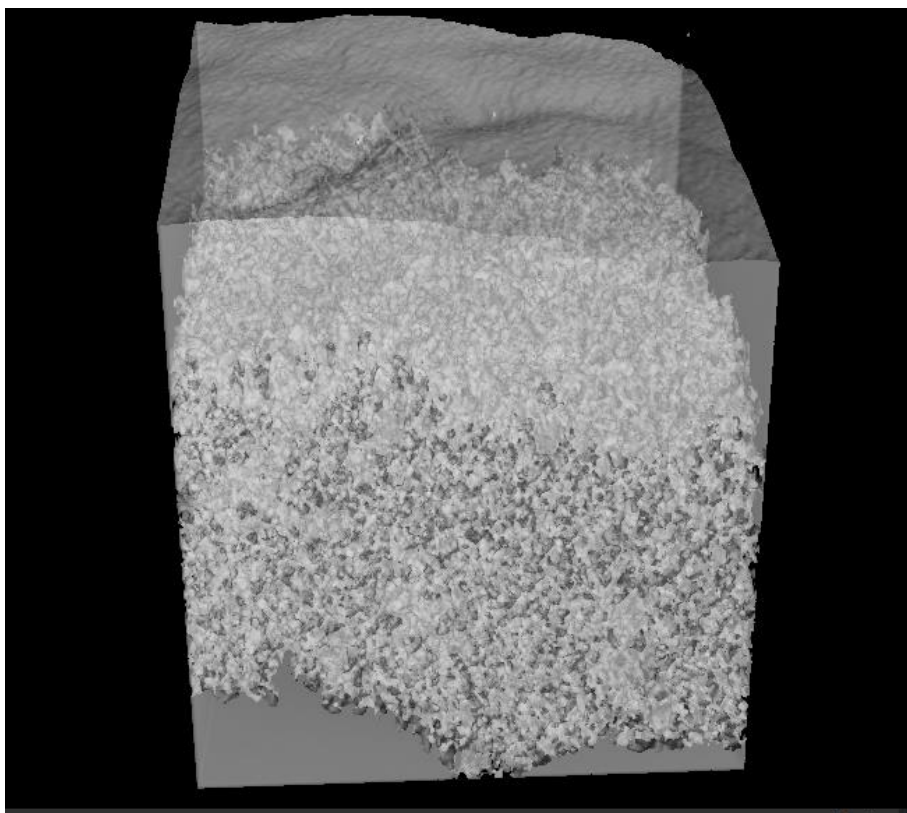
Toda metrologia baseada em tomografia computadorizada depende de uma determinação precisa da superfície no modelo de voxel. Quanto melhor a determinação da superfície, menor a incerteza de medição. Com a determinação da superfície se obtém um modo de multimateriais (fig. 110) que permite a determinação simultânea das superfícies de vários materiais dentro de um volume, resultando em um componente por material (fig. 111).

Figura 110 – Análise dos materiais



Fonte: Autor

Figura 111 – Seleção da mesh da área de interesse

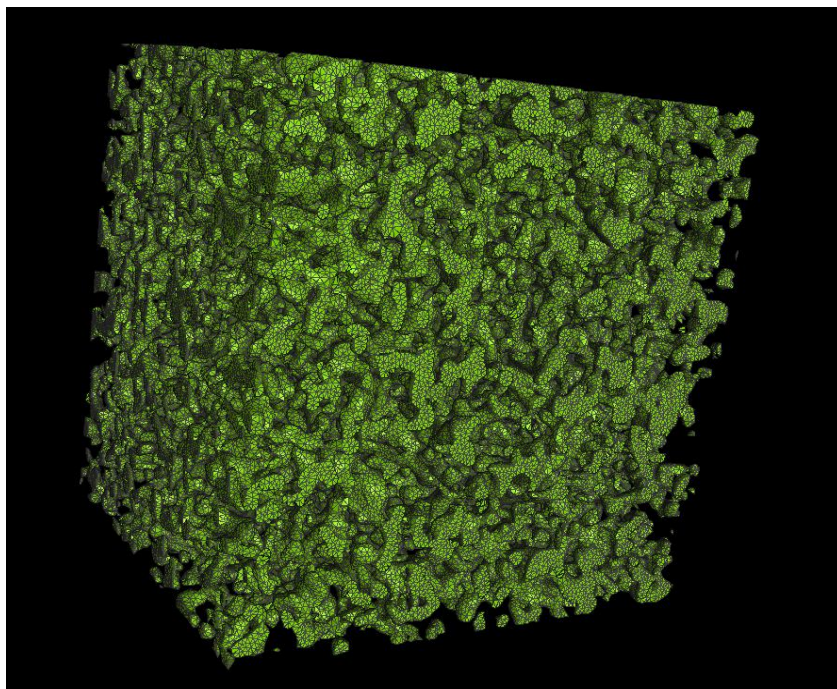


Fonte: Autor

3.7.6 Volume *mesh*

As malhas tetraédricas (meshes) podem ser exportadas para simulação FEM em um outro software para criar *meshes* de integração. Dessa maneira foi possível converter um conjunto de dados de volume monomaterial (imagens 2D) de amostras vegetais em uma malha tetraédrica (mesh 3D, fig. 112 e fig. 113). A técnica foi usada para criar, otimizar e exportar os dados de malha com conjuntos de entidades personalizados para uso do FEM e abstração tridimensionais das paredes celulares observadas nos escaneamentos de microscopia de varredura (MEV). O procedimento foi realizado com o auxílio do VGstudio max com procedimento chamado *surface mesh*.

Figura 112 – Volume mesh gerada no VGstudio max



Fonte: Autor

Figura 113 – Visualização da mesh em software 3D



Fonte: Autor

Parte IV

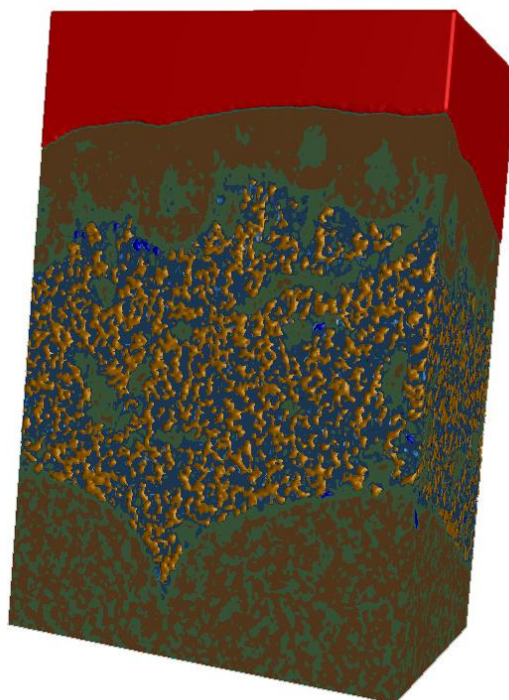
3.8 FASE 4 – Avaliando

3.8.1 Análise de porosidade da estrutura

A tomografia computadorizada permite realizar ensaios não destrutivos de peças. O estudo de seções transversais simples permite a detecção dos poros existentes e inclusões de outros materiais. Com auxílio de algoritmos pode-se calcular o volume de poros. Para a verificação do correto funcionamento dos algoritmos é necessário construir medidores apropriados. Os medidores devem ser construídos de forma que seja possível estimar o volume real dos poros (KOWALUK; WOŹNIAK, 2012).

Abaixo, na fig. 79, 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. 114, tem-se uma análise de porosidade da estrutura de onde foi retirada a *mesh*, que corresponde a aproximadamente 44% de porosidade através da *3D Porosity Analysis* que reconhece e caracteriza a porosidade em três dimensões.

Figura 114 – Análise de porosidade



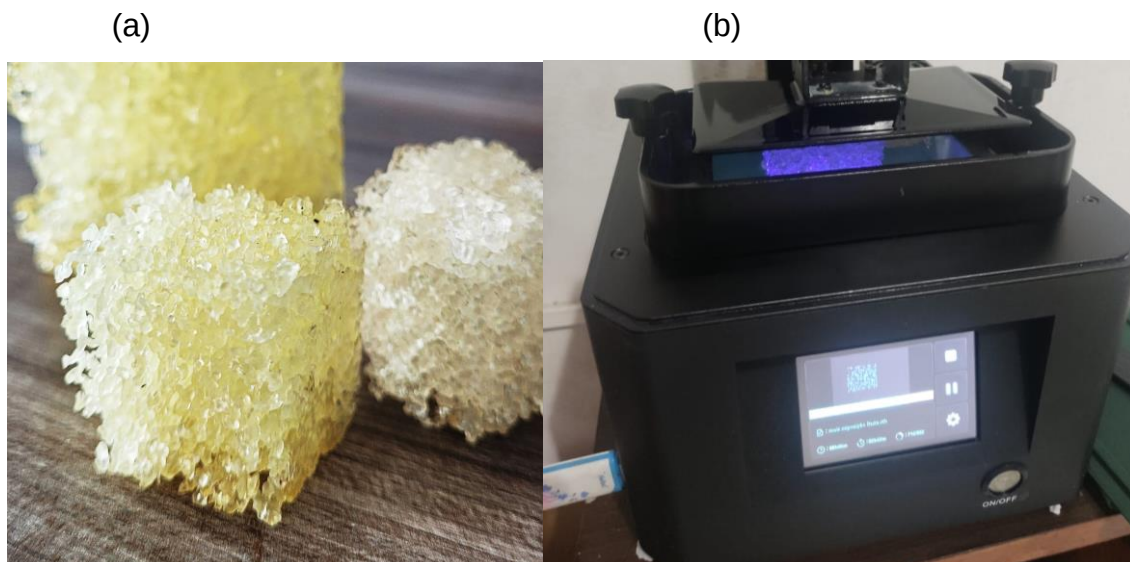
Fonte: Autor

Os parâmetros detalhados sobre tamanho, forma e número de descontinuidades 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.

3.8.2 Prototipação da estrutura bioinspirada por fabricação digital

Nessa etapa, o pesquisador vai gerar alternativas de estruturas baseadas nos frutos estudados, em que será gerada estruturas baseadas no ente biológico estudado para otimização de material utilizado (volumetria) x absorção de energia da estrutura gerada que será avaliada em softwares de simulação física, através de cálculos matemáticos na próxima fase da pesquisa. 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 (ANTREICH et al., 2019).

Figura 115 – (a) Impressão em resina flexível da estrutura bioinspirada. (b) impressora

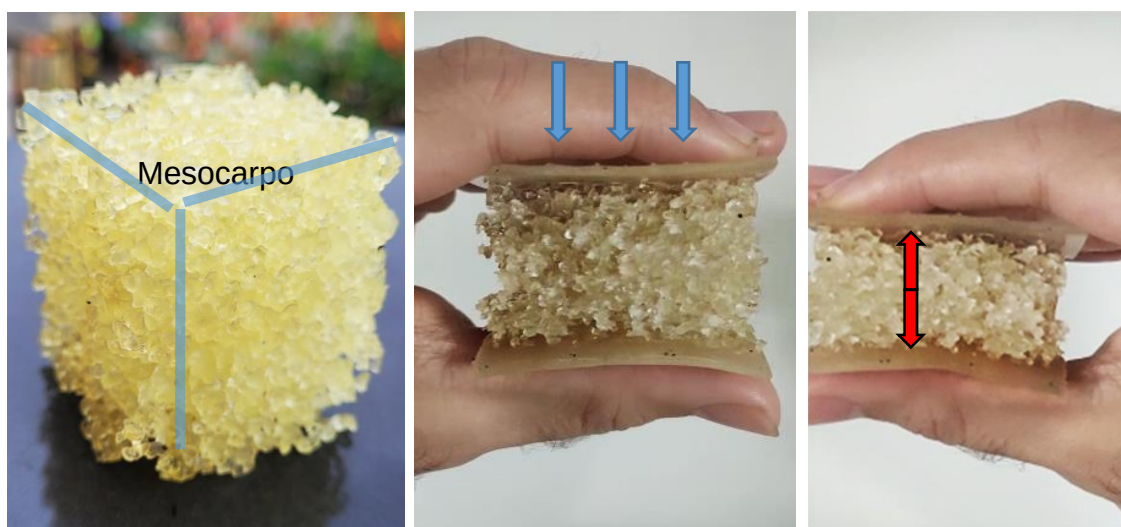


Fonte: Autor

Através da impressão em resina flexível, com a impressora Creality Ld 002h (fig. 115b), obteve-se a prototipação rápida da estrutura bioinspirada, Fig. 115a, abstraída do albedo da laranja que corresponde a Fase 05 (technical implementation). Foi utilizado o fatiador Chitubox, com tempo de impressão de aproximadamente 2h, primeiramente, a *mesh* exportada do VGStudio Max era de formato (.STL) e depois que é fatiado se torna 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. 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).

Neste trabalho, combinando a técnica de imagem microtomografia de raio-x e fabricação digital foi possível a prototipação de uma estrutura abstraída através da observação e implicações da sua estrutura no mundo 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), observados na fig. 116. Quando tensionada também foi verificada a presença de energia elástica na estrutura através de investigação empírica dos autores.

Figura 116 – (a) Estrutura bioinspirada, (b) Tensão de compressão (c) Deslocamento



Fonte: Autor

Através da biomimética é possível desenvolvimento de novas soluções e estratégias abrindo novas perspectivas e oportunidades no campo do design, engenharia e biologia. Dessa forma essa metodologia busca um importante processo de integração para a nova era industrial, ou seja, a quarta revolução industrial (OLIVEIRA et al., 2021).

Neste estudo, as estratégias encontradas na natureza foram abstraídas e aplicadas para o desenvolvimento de uma nova solução biomédica otimizando a relação entre recursos, desempenho, transferência de conhecimento, princípios e lógicas para desenvolvimento de uma estrutura hierárquica para absorção de energia. Na fig. 116a 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) e 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 fig. 116(a,b). Nesse sentido, o presente estudo surge como uma junção de uma convergência racional entre o problema, a inspiração biológica e o desenvolvimento de uma solução bioinspirada.

Os resultados alcançados são encorajadores e fornecem um ponto de partida para pesquisas futuras em que vários aspectos desta estratégia de design e produtos bioinspirados para absorção de choques mecânicos, correspondente a fase 06 (Solução de design).

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.

4 CONCLUSÃO

O estudo dos organismos encontrados na natureza, sejam básicos ou altamente complexos, fornecem uma multiplicidade de materiais, arquiteturas das estruturas, sistemas e funções que podem estabelecer analogias e inserção no processo de design para ser aplicados em diversos âmbitos. Diante disso, esse estudo explorou estratégias presentes nas frutas que desempenham a função de proteção, que podem ser aplicadas em diferentes campos de atividades como ferramenta estratégica para o design de produtos bioinspirados que visam sistemas de amortecimento, proteção contra choques mecânicos e absorção de energia.

As pesquisas exploratórias estabeleceram o direcionamento de algumas estruturas, encontradas em frutas carnosas e secas, que são análogas para a obtenção da eficiência em estruturas com grande poder de dissipação de energia, resistência e amortecimento. Os resultados obtidos, através da revisão sistemática, revelaram 22 estudos chaves, que direcionaram esta pesquisa, em que se buscou gerar conceitos de novas estruturas por inspiração em frutas.

Os estudos geraram diversos arranjos com efeitos, principalmente estruturais, revelando os métodos, objetivos de investigação e testes mecânicos com as frutas, dos quais foram abstraídas as diversas etapas metodológicas desta pesquisa, uso de softwares e métodos que foram essenciais para alcançar os resultados esperados. Nas diversas pesquisas apresentadas foram encontradas: metodologia, métodos e técnicas de pesquisas semelhantes, em que foram aplicados aos modelos biológicos e que retornaram artefatos bioinspirados, ou estudos de conformação das células que geraram inspiração para desenvolvimento de produtos bioinspirados.

A observação de microestruturas celulares incentiva a criação de materiais e formas inovadoras no desenvolvimento de novos produtos. A caracterização dessas estruturas, a nível celular, justamente com as propriedades mecânicas encontrados nesses materiais naturais podem auxiliar no entendimento das características relacionadas à morfologia e aconselhar a otimização estrutural em projetos de design industrial.

Observou-se em estudos com o pericarpo do pomelo (*Citrus maxima*), que possuem uma microestrutura hierárquica do tipo espuma, 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). Mas também foi observado nesses estudos conceitos de modelos gerados por semelhança à estrutura biológica, abstraídos de imagens 2D (MEV) e representados por uma estrutura 3D que não correspondem de fato a uma concepção precisa do ente biológico dos estudos propostos. Dessa maneira, observou-se nesses estudos que, geralmente, os arranjos celulares são estruturas complexas e que os materiais gerados tridimensionalmente, foram desenvolvidos por semelhança, a partir de imagens bidimensionais. Apresentando formas aproximadas do ente biológico.

Nesses estudos são observados cortes bidimensionais das estruturas celulares e são analisadas por meio de imagens de microscopia eletrônica. Configurando-se uma abstração aproximada da estrutura biológica. Diante disso, sabe-se que mudando a estrutura-forma de um material, muda-se a sua funcionalidade-estratégia. Com isso, proporcionando novos conceitos, porém de uma forma aproximada. Diferentemente, no estudo do *Citrus*, houve uma preocupação em reproduzir os níveis microestruturais para os níveis macroestruturais, com uma abstração acurada da estrutura biológica trazendo à luz os métodos, processos e princípios empregados para esse resultado que de forma precisa prototipou um arranjo celular presente no mesocarpo do fruto.

Por meio de aprofundamento teórico e realização das etapas abordadas nos objetivos específicos possibilitou a compreensão quantitativa da relação forma-estrutura-função dos geradores de conceito biológico, bem como os valores qualitativos apresentados nos entes bioinspirados, em que a metodologia da biomimética mostra-se como um campo promissor para o desenvolvimento de novos produtos com estratégias abstraídas da natureza que se mantém em constante evolução para melhor eficiência de suas funções específicas para funções/estratégias específicas.

No entanto ainda há necessidade de mais estudos a serem feitos sobre como a biomimética e a bioinspiração. Particularmente, para profissionais do setor industrial, como designers e engenheiros, todavia, o processo fornecido pode servir como ponto de partida para avanços em processos de bioinspiração. A avaliação das ferramentas biomiméticas e tecnológicas foram demonstradas passo a passo em que, uma vez concluídos, permitem que os profissionais usem a abordagem biomimética em seu próprio ambiente e para uma resolução específica de um problema.

Dessa maneira, esse estudo estabelece um procedimento sistemático para desenvolvimento de produtos bioinspirados. Ele se concentra no uso da biomimética como método e ensina os usuários em potencial nas etapas, processos e ferramentas utilizadas para se chegar em geração de conceitos de novos produtos industriais e a efetiva aplicação da estratégia abstraída da natureza com a sua replicação efetiva.

O resultado desse projeto de pesquisa tem característica inter e multidisciplinar que envolve designers, engenheiros, biólogos, professores, especialistas e alunos para comprovar o alto potencial das abordagens biomiméticas para o desenvolvimento de materiais técnicos inovadores. 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 e polímeros para soluções de problemas de design no mundo técnico.

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 – com a alta capacidade de desempenho, que foram aprimoradas ao longo de milhões de anos (FLORES-JOHNSON, 2018).

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).

O design de materiais é influenciado pela biomimética, que emprega ideias e métodos derivados de sistemas biológicos. A biomimética tem uma grande promessa de inovação e pode se tornar uma importante atividade comercial. Entretanto, ainda existem dificuldades nesse processo, principalmente do ponto de vista de transposição da biologia para aplicação em novos produtos e o uso de técnicas e equipamentos de difícil acesso, restritos a seletos grupos de pesquisas.

Destaca-se, contudo, que a relevância metodológica da exploração biomimética é muito elevada para o contexto do Design, evidenciando um grande potencial para a inovação. Não obstante, há uma necessidade de alternativas nos processos adaptáveis, de mais fácil acesso e com menor custo, para fomentar as potencialidades investigativas que o contexto exige. Em vista disso, provocando sugestões para a continuidade das análises levando em conta a alcançabilidade de recursos para o público projetista, de modo alternativo, como por exemplo a exploração de outros recursos semelhantes e mais acessíveis, expandindo assim o potencial de desenvolvimento metodológico, para além do cenário acadêmico/científico. Sabe-se que nem sempre é possível.

A fim de facilitar a resolução de problemas, por parte de engenheiros, arquitetos e designers é proposto um modelo do processo de biomimética orientado a problemas e desenvolvimento de novos produtos. E observou-se que as ferramentas existentes e técnicas inovadoras podem auxiliar no processo biomimético. Além disso, estudos de casos comparativos, a inclusão de novas ferramentas e o reconhecimento das dificuldades encontradas levou a busca de novas ferramentas e aprimoramento para o desenvolvimento do modelo.

Isso proporcionou direcionar futuros pesquisadores, estudantes e profissionais ao longo do processo para desenvolvimento de produtos bioinspirado, ajudando-os a selecionar as ferramentas certas para seu nível de utilidades. Dessa forma, essa pesquisa proporciona um processo de design fundamental que pode ser aprimorado pela adição de informações (inputs) experimentais coletadas de pesquisas envolvendo um grupo maior de usuários (com perfis menos especializados).

As atividades foram realizadas de forma individual e em equipes, auxiliadas por profissionais e divididas por habilidades dos participantes, dessa maneira, possibilitou a utilização de recursos avançados, que tinham conhecimentos em determinados softwares e equipamentos.

A temática abordada na pesquisa, versou sobre a revisão de uma metodologia de projeto, focada no processo de biomimética, considerando o estudo do pericarpo da *Citrus sinensis*. A caracterização procedural de análise do elemento natural para fins de detecção de valores funcionais e estruturais, correlacionáveis à dissipação de grandes quantidades de energia e amortecimento durante o impacto do fruto sobre o solo quando desprendido da árvore. Considerando-se que a análise proposta para esta amostra natural (*Citrus sinensis*) seguiu um protocolo tipicamente atrelado a uma infraestrutura laboratorial de grande impacto, com uso de MEV e Microtomografia Computadorizada.

Por fim, o designer biomimético deve ser capaz de se comunicar com outras áreas de conhecimento que visem a natureza, biologia, ciência, assim como estar em constante aperfeiçoamento com relação as ferramentas tecnológicas de acordo com as necessidades do design.

REFERÊNCIAS

- AJDARI, Amin; NAYEB-HASHEMI, Hamid; VAZIRI, Ashkan. Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures. **International Journal of Solids and Structures**, v. 48, n. 3-4, p. 506-516, 2011.
- ALVES, Charline Zaratini; GODOY, Amanda Regina; CORRÊA, Luiz de Souza. Adequação da metodologia para o teste de germinação de sementes de pitaia vermelha. **Ciência Rural**, v. 41, p. 779-784, 2011.
- ANTREICH, Sebastian 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.
- ARAÚJO, Rodrigo Barbosa de; ARRUDA, Amilton José Vieira; ARRUDA, Emília Cristina Pereira. Investigação de Estratégias de Leveza e Resistência das Fibras de Agave para material de Impressão 3D Bioinspirado. **MIX Sustentável**, v. 5, n. 1, p. 53-65, 2019.
- ARRUDA, A. et al. **Tópicos em design: biomimética, sustentabilidade e novos materiais**. Curitiba, PR: Insight, 2019. ISBN 978-85-62241-65-9
- ARRUDA, AMILTON JOSÉ VIEIRA. **Bionic Basic: verso um nuovo modello di ricerca progettuale**. 2002. Tese de Doutorado. Tese de doutorado em Desenho Industrial, Politecnico di Milano–Doutorado em Desenho Industrial e Comunicação Multimídia, Milão.
- ARRUDA, Amilton. A Biomimética e a Sustentabilidade: natureza a serviço do tecnologia. 2018.
- ATAIDE, R. M.; GALLAGHER, C. L. Bioinspiration: an economic progress report. **Technical Report**, 2013.
- BARTHLOTT, Wilhelm; MAIL, M.; NEINHUIS, C. Superhydrophobic hierarchically structured surfaces in biology: evolution, structural principles and biomimetic applications. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 374, n. 2073, p. 20160191, 2016.
- BAUMEISTER, Dayna et al. **Biomimicry**. 2014.
- BERNACCI, Luís Carlos et al. Espécies de maracujá: caracterização e conservação da biodiversidade. **Maracujá: germoplasma e melhoramento genético**, v. 1, p. 559-586, 2005.
- BHUSHAN, B. (2016). **Biomimetics. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering**. doi:10.1007/978-3-319-28284-8
- BHUSHAN, B. **Biomimetics: bioinspired hierarchical-structured surfaces for green science and technology**. Springer, 2016
- BUDHOLIYA, S. et al. State of the Art Review about Bio-Inspired Design and Applications: An Aerospace Perspective. **Applied Sciences**, v. 11, n. 11, p. 5054, 2021.

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

CARVALHO, Carolina Rodrigues Victor de; MAPELI, Ana Maria; OLIVEIRA, Andreia Barroncas de. Anatomical characterization of *Passiflora cincinnata* Mast. fruit subjected to refrigeration. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 43, 2021.

CHUNCHO, G.; CHUNCHO, C.; AGUIRRE, Z. H. Anatomía y morfología vegetal. **University of Nebraska de Loja: Loja, Ecuador**, 2019.

CONFORTO, Edivandro Carlos; AMARAL, Daniel Capaldo; SILVA, SL da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. **Trabalho apresentado**, v. 8, 2011.

CRUZ, Jaqueline Fontes Moreau. Caracterização das sementes de variedades de cacau *Theobroma cacao* L. resistentes à vassoura de bruxa durante a fermentação e após a secagem. 2012.

DARDICK, Chris; CALLAHAN, Ann M. Evolution of the fruit endocarp: molecular mechanisms underlying adaptations in seed protection and dispersal strategies. **Frontiers in plant science**, v. 5, p. 284, 2014.

DÁRIO, F. R. Dinâmica de populações em florestas tropicais. **Episteme**, v. 17, p. 421-439, 2006.

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. EdIPUCRS, 2007.

DICKINSON, W. **Integrative Plant Anatomy**. N. York. 2000.

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

FAGUNDES, Hilton Albano Vieira. Design e tecnologia: biomorfose de frutos de casca dura aplicada à gramática da forma. 2021.

FINANCE, A. T. C. C. Industry 4.0 Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies. **Finance, Audit Tax Consulting Corporate: Zurich, Swiss**, p. 1-12, 2015.

FISCHER, Sebastian F. et al. Pummelos as concept generators for biomimetically inspired low weight structures with excellent damping properties. **Advanced Engineering Materials**, 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.* 8 (2018) 1–12.

FRANCO, Maria Amélia Santoro. Pedagogia da pesquisa-ação. **Educação e pesquisa**, v. 31, p. 483-502, 2005.

GHIRADELLA, H. Insect cuticular surface modifications: scales and other structural formations. In: **Advances in insect physiology**. Academic Press, 2010. p. 135-180.

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

HALLETT, I. C.; SUTHERLAND, P. W. Kiwifruit Skins: The Fruit's Natural Packaging. In: **VI International Symposium on Kiwifruit 753**. 2006. p. 89-96.

HELMS, M.; VATTAM, S. S.; GOEL, A. K. Biologically inspired design: process and products. **Design studies**, v. 30, n. 5, p. 606-622, 2009.

HOLLAND, D. et al. 2 Pomegranate: Botany, horticulture, breeding. **Horticultural reviews**, v. 35, n. 2, p. 127-191, 2009.

ISO (International Organization for Standardization) (2015) ISO 18458:2015: Biomimetics – terminology, concepts and methodology. ISO, Geneva, Switzerland.

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

JELINEK: **Biomimetics. A Molecular Perspective**. 2013, ISBN: 978-3-11-028117-0

JOHANSEN, D. 1940. **Plant microtechnic**. Mc Grow Hill Book Company, Inc. New York.

KANDA, G. B.; DE OLIVEIRA SOUZA, Rejane; DE HELD, Maria Sílvia Barros. Matriz morfológica e biomimética: geração de alternativas em design. **Projetica**, v. 9, n. 1, p. 53-68, 2018.

KAUPP, Gerd; NAIMI-JAMAL, Mohammad Reza. Nutshells' mechanical response: from nanoindentation and structure to bionics models. **Journal of Materials Chemistry**, v. 21, n. 23, p. 8389-8400, 2011.

KEVAN, Peter G.; VIANA, Blandina F. The global decline of pollination services. **Biodiversity**, v. 4, n. 4, p. 3-8, 2003.

KOWALUK, T.; WOŹNIAK, A. Study of porosity measurement using the computer tomograph. **Pomiary Automatyka Robotyka**, v. 16, p. 82-86, 2012.

KRAUS, J. & ARDUIN, M. 1997. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. EDUR, Rio de Janeiro.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. Fundamentos da metodologia científica. In: **Fundamentos da metodologia científica**. 2010. p. 320-320

LAKHTAKIA, A.; MARTÍN-PALMA, R. J. (Ed.). **Engineered biomimicry**. Newnes, 2013.

LANGELLA, Carla. **Design e scienza**. List-Laboratorio Editoriale, 2019.

LANGELLA, Carla; SANTULLI, Carlo. Processi di crescita biologica e Design parametrico. **MD Journal**, v. 3, n. 1, p. 14-27, 2017.

LI, Ting-Ting 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.

LIMA, Cristiane Andréa de et al. Características físico-químicas, polifenóis e flavonoides amarelos em frutos de espécies de pitaias comerciais e nativas do cerrado. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, p. 565-570, 2013.

LOOYRACH, Jarawee 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.

LU, Chuanhao et al. The mystery of coconut overturns the crashworthiness design of composite materials. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 168, p. 105244, 2020.

MAUSETH, James D. et al. Olfant anatomy. 1988.

MOREIRA, Felismina TC et al. Synthesis of molecular biomimetics. In: **Biomimetic Technologies**. Woodhead Publishing, 2015. p. 3-31.

MÜLLER, R. et al. Biodiversifying bioinspiration. **Bioinspiration & Biomimetics**, v. 13, n. 5, p. 053001, 2018.

MUÑOZ-RODRÍGUEZ, Pablo et al. Reconciling conflicting phylogenies in the origin of sweet potato and dispersal to Polynesia. **Current Biology**, v. 28, n. 8, p. 1246-1256. e12, 2018.

NAGEL, Jacquelyn KS et al. Function-based, biologically inspired concept generation. **Ai Edam**, v. 24, n. 4, p. 521-535, 2010.

OLIVEIRA, Antônio Roberto Miranda de ;ARRUDA, Amilton José Vieira de; 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**, n. 149, p. 189-206, 2021.

ORTIZ, Jonel; ZHANG, Guanglu; MCADAMS, Daniel A. A model for the design of a pomelo peel bioinspired foam. **Journal of Mechanical Design**, v. 140, n. 11, p. 114501, 2018.

PALOMBINI, Felipe Luis et al. Biomimetic systems and design in the 3D characterization of the complex vascular system of bamboo node based on X-ray microtomography and finite element analysis. **Journal of Materials Research**, v. 35, n. 8, p. 842-854, 2020.

PICULO, F. et al. Metodologia e equipamentos. **Guia ilustrado da morfologia do tecido uretral de ratas**, p. 13-26, 2014.

PREIß, Susanne; DEGENHARDT, Jörg; GERSHENZON, Jonathan. Plant-Animal Dialogues. **Ecological biochemistry: environmental and interspecies interactions**, p. 312-330, 2014.

PRIMROSE, Sandy B. **Biomimetics: nature-inspired design and innovation**. John Wiley & Sons, 2020.

QUEIROZ, P. J. et al. MICROTOMOGRÁFIA COMPUTADORIZADA: PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO E UTILIZAÇÃO EM AMOSTRAS BIOLÓGICAS. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, v. 16, n. 29, 2019.

RICHARDSON, Roberto Jarry; SOCIAL, Pesquisa. Métodos e Técnicas—3ª edição. **São Paulo, Atlas**, 2008.

RIGOTTI, M.; HIGUTI, A. Metabolismo Secundário. **Farmacobotânica**. Disponível em:< <http://farmacobotanica.xpg.uol.com.br/aula6.html>>. Acesso em, v. 10, 2011.

RISBUD, Aditi S.; BARTL, Michael H. Solution-based techniques for biomimetics and bioreplication. **Engineered Biomimicry**, p. 359-382, 2013.

ROWLAND, Regina. Biomimicry step-by-step. **Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials**, v. 6, n. 2, p. 102-112, 2017.

RUZIN, Steven E. et al. **Plant microtechnique and microscopy**. New York: Oxford University Press, 1999.

SÁ, Alice AM; VIANA, Dianne Magalhães. Design e Biomimética: uma revisão sistemática da literatura.

SAN HA, Ngoc 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, Clément; ARRIBART, Hervé; GIRAUD GUILLE, Marie Madeleine. 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.

SCUTT, C.P. et al. An evolutionary perspective on the regulation of carpel development. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 10, p. 2143-2152, 2006

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.

SHARMA, S.; SARKAR, Prabir. Biomimicry: exploring research, challenges, gaps, and tools. In: **Research into design for a connected world**. Springer, Singapore, 2019. p. 87-97.

SONEGO, Marília; FLECK, Claudia; PESSAN, Luiz Antonio. Hierarchical levels of organization of the Brazil nut mesocarp. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-13, 2020.

SOUSA, Felipe Leon Nascimento de. **Filmes super-hidrofóbicos biomimetizados a partir de estruturas hierárquicas da superfície de folhas de espécies vegetais da caatinga**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

SOUZA MINAYO, Maria Cecília de; DESLANDES, Suely Ferreira; GOMES, Romeu. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. Editora Vozes Limitada, 2011.

SOUZA, Margarete Magalhães et al. Structural, hystochemical and cytochemical characteristics of the stigma and style in *Passiflora edulis* f. *flavicarpa* (Passifloraceae). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 49, p. 93-98, 2006.

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

STACH, E. Structural morphology and self-organization. **Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures**, v. 51, n. 3, p. 217-231, 2010.

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.

THOMÉ, Magali; RICHALOT, Elodie; BERTHIER, Serge. Light guidance in photonic structures of Morpho butterfly wing scales. **Applied Physics A**, v. 126, n. 10, p. 1-11, 2020.

UFODIKE, Chukwuzubelu Okenwa et al. Design and modeling of bamboo biomorphic structure for in-plane energy absorption improvement. **Materials & Design**, v. 205, p. 109736, 2021.

VAN BREUGEL, Klaas; KOLEVA, Dessi; VAN BEEK, Ton. **Ageing of Materials and Structures**. Springer, 2018.

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.

VIGNOLINI, Silvia et al. Pointillist structural color in Pollia fruit. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 39, p. 15712-15715, 2012.

VUKUSIC, Pete; SAMBLES, J. Roy. Photonic structures in biology. **Nature**, v. 424, n. 6950, p. 852-855, 2003.

VUKUSIC, Peter; SAMBLES, J. R.; LAWRENCE, C. R. Colour mixing in wing scales of a butterfly. **Nature**, v. 404, n. 6777, p. 457-457, 2000.

WANG, Hongyang 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.

WANIECK, Kristina et al. Biomimetics and its tools. **Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials**, v. 6, n. 2, p. 53-66, 2017.

WASIK, Bethany R. et al. Artificial selection for structural color on butterfly wings and comparison with natural evolution. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 33, p. 12109-12114, 2014.

WHITESIDES, G. M. Bioinspiration: something for everyone. **Interface focus**, v. 5, n. 4, p. 20150031, 2015.

WILTS, Bodo D.; LEERTOUWER, Hein L.; STAVENGA, Doekele G. Imaging scatterometry and microspectrophotometry of lycaenid butterfly wing scales with perforated multilayers. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 6, n. suppl_2, p. S185-S192, 2009.

WOODBURY, Robert. **Elements of parametric design**. Taylor and Francis, 2010.

XIA, Zhenhai. **Biomimetic principles and design of advanced engineering materials**. John Wiley & Sons, 2016.

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

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

ZHAO, Ning et al. Bioinspired materials: from low to high dimensional structure. **Advanced Materials**, v. 26, n. 41, p. 6994-7017, 2014.